

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## NÁVRH A REALIZACE VN VÝKONOVÉHO GENERÁTORU F=13.56 MHZ

DESIGN AND REALIZATION OF A HIGH-VOLTAGE POWER GENERATOR F=13.56 MHZ

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Potůček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Patrik Potůček

**ID:** 211170

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh a realizace VN výkonového generátoru $f=13.56$ MHz

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte problematiku návrhu vysokofrekvenčních systémů, zaměřte se na model generátoru pro dutinový rezonátor  $f=13.56$  MHz.
2. Navrhněte generátor s maximálním výstupním výkonem  $P=1000$  W a jeho napájení do dutinového rezonátoru s minimalizací stojaté vlny na budícím vedení.
3. Navrhněte koncepci měřicí sondy pro vyhodnocení složek elektromagnetického pole do mezní frekvence 500 MHz.
4. Navrhněte funkční zapojení generátoru pro geometrii a uspořádání komory pro formování VN výboje plasmatu.
5. Proveďte návrh elektronických částí a jejich numerickou simulaci a vyhodnocení, navrhněte laboratorní testy, navrhněte postup oživení pro příkladnou aplikaci jednoduchého uspořádání plasmové komory s budicí frekvencí 13.56 MHz.
6. Na části funkčních zařízení generátoru proveďte laboratorní testy/experimenty, směřujte k celkovému testu funkčnosti generátoru.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DĚDEK, L, DĚDKOVÁ, J. Elektromagnetismus. 2. vyd. Brno: VITIUM, 2000. 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
- [2] KEITHLEY, J, R. Low level measurement, Keithley, USA, 2005.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom, realizáciou a následným popisom oživenia vysoko napäťového výkonového generátoru pracujúceho na frekvencii  $f = 13.56$  MHz. Súčasťou práce je tiež návrh meracej sondy, ktorej úlohou je vyhodnocovať zložky elektromagnetického poľa do frekvencie  $f = 500$  MHz. V práci sú taktiež spomenuté súčasné riešenia v oblasti výroby plazmy a vyhodnocovania jej parametrov.

## Kľúčové slová

Generovanie plazmy, diagnostika plazmy, vysokofrekvenčná plazma, elektronický generátor

## Abstract

This thesis deals with the design and practical realization of a high-voltage power generator, which works at a frequency of  $f = 13.56$  MHz. Thesis also deals with the design of a probe dedicated to measuring the electro-magnetic spectrum of the plasma. The probe should be able to work in the frequency range of  $f = 0 - 500$  MHz. State of the art in the field of plasma generation and plasma diagnostics are discussed.

## Keywords

Plasma generating, plasma diagnostics, RF plasma, electronic generator

## **Bibliografická citácia**

POTÚČEK, Patrik. *Návrh a realizace VN výkonového generátoru  $f=13.56$  MHz*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133770>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Pavel Fiala.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Patrik Potůček*

**VUT ID studenta:** *211170*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Návrh a realizace VN výkonového generátoru  $f=13.56$  MHz*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Prof. Ing. Pavlovi Fialovi, Ph.D. za metodickú a odbornú pomoc pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Taktiež chcem poďakovať oponentom za cenné rady a pripomienky spojené s návrhom generátoru. Práca vznikla s podporou grantu GAČR (GA-20-14105S) a experimenty s infraštruktúrou Centra SIX.

V Brně dne: 24. mája 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1. PLAZMA .....</b>	<b>13</b>
1.1 DELENIE PLAZMY .....	13
1.1.1 Nízkoteplotná plazma .....	13
1.1.2 Vysokoteplotná plazma .....	13
1.2 DÔLEŽITÉ PARAMETRE PLAZMY .....	14
1.2.1 Debye-eho tienenie .....	14
1.2.2 Frekvencia plazmy .....	14
<b>2. SPÔSOBY GENEROVANIA PLAZMY .....</b>	<b>16</b>
2.1 VÝROBA PLAZMY POMOCOU ELEKTRICKÝCH VÝBOJOV V PLYNOCH .....	16
2.1.1 Jednosmerný tlejivý výboj (DC glow discharge) .....	16
2.1.2 Vysokofrekvenčný výboj (RF discharge) .....	19
2.1.3 Mikrovlnný výboj (Microwave discharge) .....	20
<b>3. MERANIE V PLAZMOVÝCH KOMORÁCH .....</b>	<b>22</b>
3.1 MERANIE MAGNETICKÉHO POĽA .....	22
3.1.1 Rogowského cievka .....	22
3.2 LANGMUIROVA SONDA .....	23
3.2.1 Reflektometria .....	24
3.2.2 Spektroskopia .....	25
<b>4. RIEŠENIA GENERÁTOROV PRE PLAZMOVÉ KOMORY, <math>F = 13.56</math> MHZ .....</b>	<b>26</b>
4.1 JEDNOTKA PRF-1150 .....	26
4.2 ZOSILŇOVAČ V TRIEDE D, MICROSEMI .....	28
<b>5. ROZBOR ZADANIA .....</b>	<b>29</b>
5.1 CIEĽOVÁ PLAZMOVÁ KOMORA .....	29
5.2 PRISPÔSOBOVACÍ ČLEN KOMORA/GENERÁTOR .....	30
5.3 POŽADOVANÉ PARAMETRE KONŠTRUOVANÉHO GENERÁTORU .....	31
<b>6. PARAMETRICKÉ PRISPÔSOBENIE KOMORA/GENERÁTOR .....</b>	<b>33</b>
6.1 APLIKOVATEĽNÉ RIEŠENIA MINIMALIZÁCIE STOJATEJ EMG VLNY .....	37
<b>7. NÁVRH KONCEPCIE GENERÁTORU .....</b>	<b>38</b>
7.1 SYSTÉM TVORENÝ SPÍNACÍMI JEDNOTKAMI BEHLKE .....	38
7.2 OBVODOVÉ RIEŠENIA GENERÁTORU .....	40
7.2.1 Úprava Jednotky PRF-1150 .....	42
7.2.2 Zapojenie tranzistoru „FLYBACK“ .....	43
7.2.3 Pol-mostové zapojenie .....	44
7.2.4 Mostové zapojenie .....	47
7.3 FINÁLNY VÝBER VHODNEJ KONCEPCIE .....	48



<b>8. VÝBER VHODNÝCH KOMPONENTOV .....</b>	<b>50</b>
8.1 KRYŠTÁLOVÝ OSCILÁTOR .....	50
8.2 PRIPOJENIE EXTERNÉHO VF GENERÁTORU AKO ZDROJ SIGNÁLU .....	50
8.3 OŠETRENIE HAZARDNÝCH STAVOV TRANZISTOROV .....	51
8.3.1 Ošetrovanie pomocou diskretných súčiastok .....	52
8.3.2 Ošetrovanie pomocou integrovaného obvodu .....	53
8.4 GALVANICKÉ ODDELENIE .....	53
8.4.1 Galvanické oddelenie pomocou transformátoru .....	53
8.4.2 Pol-mostový gate driver s impedančným oddelením .....	54
8.4.3 Galvanické oddelenie pomocou optočlenu .....	54
8.5 VÝBER VHODNÉHO VÝKONOVÉHO TRANZISTORU A JEHO BUDIČU GATE ELEKTRODY .....	55
<b>9. OBVODOVÝ NÁVRH GENERÁTORU .....</b>	<b>57</b>
9.1 NAPÁJACIA ČASŤ .....	57
9.2 RIADIACA ČASŤ .....	58
9.3 VÝKONOVÁ ČASŤ .....	59
<b>10. NÁVRH DPS.....</b>	<b>60</b>
10.1 MODELOVANIE TRANZISTORU DRF1201.....	60
10.2 NÁLEŽITOSTI NÁVRHU, NÁVRH DOSKY DPS.....	61
<b>11. MERACIA SONDA .....</b>	<b>63</b>
11.1 PRINCÍP ČINNOSTI ROGOWSKÉHO CIEVKY .....	63
11.2 VYHOTOVENIA ROGOWSKÉHO CIEVKY .....	64
11.3 MODEL ROGOWSKÉHO CIEVKY .....	64
<b>12. METODIKA OŽIVOVANIA, LABORATÓRNE TESTY.....</b>	<b>67</b>
12.1 LABORATÓRNE TESTY .....	68
<b>13. ZÁVER.....</b>	<b>69</b>
<b>LITERATÚRA.....</b>	<b>70</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>76</b>
<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>78</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

2.1	Zjednodušené zobrazenie situácie výroby plazmy pomocou jednosmerného tlejivého výboju, prevzaté a upravené z [4].	17
2.2	Parametre produkovanej plazmy vo vyznačených častiach komory (vľavo), prevzaté z [9] a ukážka výboju v plazmovej komore (vpravo).	17
2.3	Volt-ampérová charakteristika pre jednotlivé typy tlejivých DC výbojov, prevzaté a upravené z [2], [3].	18
2.4	Farby a tvary jednotlivých výbojov pre rôzne plyny použité v komorách, prevzaté z [12].	18
2.5	Zjednodušené znázornenie systému pre výrobu kapacitne viazanej plazmy, prevzaté z [4].	19
2.6	Zjednodušené znázornenie systému pre výrobu indukčne viazanej plazmy, prevzaté z [9].	20
2.7	Bloková schéma systému na výrobu plazmy mikrovlnným výbojom, prevzaté z [15].	21
2.8	Jednotlivé princípy generovania plazmy s parametrami a využitím v praxi, prevzaté z [2].	21
3.1	a) Znázornenie Rogowského cievky, b) Znázornenie toku magnetickej indukcie pri priechode prúdu vnútri cievky, c) Znázornenie použitia Rogowského cievky pre merania v tokamaku. Prevzaté z [16].	23
3.2	Konštrukcia Langmuirovej sondy, prevzaté z [16].	24
3.3	Ideálny priebeh V/A charakteristiky získanej pomocou Langmuirovej sondy, prevzaté z [20].	24
3.4	Porovnanie profilov hustoty plazmy získaných reflektometriou a Thomsonovým rozptylom - poukazujú na správnosť výsledku získaného pomocou reflektometrie, prevzaté z [16].	25
3.5	Priebeh získaný pomocou Optickej emisnej spektroskopie, prevzaté z [21].	25
4.1	Zjednodušený blokový diagram generátoru firmy IXYS.	26
4.2	Zmena striedy signálu, prevzaté z [46].	27
4.3	Zjednodušený blokový diagram generátoru firmy Microsemi.	28
5.1	Obraz impedancie plazmovej komory v komplexnej rovine.	29
5.2	Náhradný obvod plazmovej komory.	30
5.3	Náhradný obvod prispôsobovacieho člena generátor/plazmová komora.	30
5.4	Náhradný obvod pre stav prispôsobenia plazmovej komory.	31
6.1	Náhradná schéma plazmovej komory, prevzaté z [13].	33
6.2	Príklad schematického zapojenia zobrazuje zjednodušene zdroj (source), obvod impedančného prispôsobenia (L-network) a náhradnú schému plazmovej komory (Discharge)- pre CCP plazmu, prevzaté z [9].	34
6.3	Ukážka Smithového diagramu, prevzaté z [26].	34
6.4	Geometrický model plazmovej komory, prevzaté z [27].	35
6.5	Signál na vstupe plazmovej komory, prevzaté z [28].	35
6.6	Amplitúdovo-frekvenčné spektrum obdĺžnikového signálu z obrázku 6.5, prevzaté z [28].	36
7.1	a) Spínacia jednotka BEHLKE HTS 121-01-C, compact prevedenie, prevzaté z [30], b) Spínacia jednotka BEHLKE HTS 121-03-C, compact prevedenie, prevzaté z [31].	38
7.2	Zjednodušený blokový diagram generátoru tvoreného spínacími jednotkami Behlke.	40
7.3	Principiálna schéma zapojenia „FLYBACK“.	41
7.4	Principiálne schémy pol-mostových zapojení, pol-most s nesymetrickým napájaním (a) a so symetrickým napájaním (b).	41
7.5	Principiálna schéma mostového zapojenia.	42
7.6	Zjednodušená schéma upravenej jednotky PRF-1150.	42
7.7	Priebehy na výstupe upravenej jednotky PRF1150.	43
7.8	Zjednodušená schéma zapojenia „FLYBACK“.	43
7.9	Priebehy na výstupe Flyback zapojenia.	44
7.10	Zjednodušená schéma pol-mostového zapojenia s nesymetrickým napájaním generátoru.	45

7.11	Priebehy na výstupe nesymetricky napájaného pol-mosta. ....	45
7.12	Zjednodušená schéma pol-mostového zapojenia so symetrickým napájaním generátoru. ....	46
7.13	Priebehy na výstupe symetricky napájaného pol-mosta. ....	46
7.14	Zjednodušená schéma mostového zapojenia. ....	47
7.15	Priebehy na výstupe mostového zapojenia. ....	48
7.16	Zjednodušený blokový diagram generátoru využívajúceho pol-mostovej koncepcie so symetrickým napájaním. ....	49
8.1	Znázornenie prepínania zdroju signálu pomocou otočného prepínača. ....	51
8.2	Znázornenie prepínania zdroju signálu pomocou VF relé. ....	51
8.3	Neošetrené hazardné stavy budenia tranzistorov (horný priebeh) a ich ošetrené ekvivalenty (spodný priebeh). ....	52
8.4	Schéma vnútorného zapojenia LMG1210, prevzaté z [38]. ....	53
8.5	Schéma vnútorného zapojenia Infineon EICEdriver, prevzaté z [40]. ....	54
8.6	Principiálna schéma optočlenu, prevzaté z [41] . ....	55
9.1	Principiálna schéma napájania obvodov spojených s tranzistormi Q1 a Q2. ....	58
10.1	Návrh schematickej značky tranzistoru DRF1201. ....	60
10.2	Návrh footprintu tranzistoru DRF1201. ....	60
10.3	3D model tranzistoru DRF1201. ....	61
10.4	Ukážka DPS signálovej časti v návrhovom prostredí Eagle. ....	62
11.1	Náhradná schéma Rogowského cievky. ....	63
11.2	Geometrická konštrukcia Rogowského cievky/senzoru, a) typická konštrukcia, b) konštrukcia s kríženým vynutím. ....	65
11.3	Výsledné priebehy simulácie Rogowského cievky/senzoru pre budenie signálom $f = 13.56$ MHz (hore) $f = 500$ MHz (dole). ....	65
11.4	Principiálna schéma merenia s Rogowského cievkou. ....	66

## ZOZNAM TABULIEK

7.1	Parametre vybraných jednotiek Behlke [30], [31], [32] .....	39
8.1	Uvažované výkonové MOSFET tranzistory pre realizáciu generátoru [42], [57], [58], [59], [60], [61], [62] .....	55

# ÚVOD

Plazma je tzv. štvrté skupenstvo hmoty, ktoré podľa viacerých zdrojov tvorí prevažnú väčšinu vesmíru [1]. Vo voľnej prírode na Zemi je jej výskyt však veľmi obmedzený. Sledovať ju môžeme napríklad v podobe bleskov či ako svit polárnej žiary [1]. Napriek tomu, že vo voľnej prírode sa takmer nevyskytuje, existujú viaceré metódy, pomocou ktorých dokážeme plazmu vytvoriť pomocou laboratórnej techniky [2], [3].

Takmer okamžite sa vhodné aplikácie laboratórne vytvorenej plazmy objavili v priemysle a to podľa [4] v procesoch rezania, zvárania a povrchovej úpravy kovov, výrobe polovodičovej techniky ale aj na likvidáciu nebezpečného odpadu [5]- plazmové splyňovanie. Práve likvidácia odpadov pomocou plazmového splyňovania je pomerne často diskutovaná téma ako ekologickejší nástroj likvidácie komunálneho odpadu, ktorý by mal postupne vytlačiť potrebu skládkovania a neekologického spaľovania odpadu [6]. V poslednom období možno vidieť rozširovanie aplikácií plazmy aj do ďalších odvetví. Do významného postavenia sa dostáva na poli medicíny pri dekontaminácii povrchov a v liečení rán [4].

Aj napriek tomu, že bola prvýkrát popísaná už v roku 1879 Sirom Williamom Crooksom (pomenovanie jej dali v roku 1929 Lewi Tonks a Irvin Langmuir) [4], jej praktické využitie má stále veľký, zatiaľ neobjavený potenciál. Práve snaha odhaliť plný potenciál plazmy je v súčasnej dobe dôvodom realizácie nespočetných laboratórnych pokusov po celom svete [2]. Momentálne je veľmi intenzívne skúmaná možnosť použitia plazmy v energetike. Konkrétne sa jedná o zostavenie finančne rentabilného tokamaku-zariadenia, v ktorom pomocou plazmy dosahujeme riadenej termálnej fúzie [1].

Všetky elektromagneticky budené systémy na výrobu plazmy ale potrebujú budiaci generátor [7], ktorý by bol schopný dodávať pomerne veľký výkon do plazmovej komory. Cieľom predloženej práce je zostrojenie vhodného elektronického generátoru určeného pre už hotový plazmový zdroj- plazmovú komoru. Práca je rozdelená na viacero tematických častí. V prvej časti práce priblížim základy teórie plazmy a načrtnem problematiku generovania plazmy na základe elektromagnetického výboja v laboratórnych podmienkach spolu s aktuálnymi spôsobmi, ktoré sú pri výrobe plazmy používané. Taktiež tu budú popísané viaceré princípy merania parametrov plazmy- ako pasívne, tak aj aktívne. Časť pojednávajúca o meraní parametrov plazmy bude potrebná k pochopeniu podstaty problémov, ktoré budú spojené s praktickým návrhom generátoru, nastavením jeho chodu a kvalitou meracej sondy.

Nasledujúca časť práce bude pojednávať o návrhu a praktickom zostrojení výkonového generátoru ako aj zostrojení jednoduchej meracej sondy. Budú tu opísané problémy vzniknuté pri návrhu a realizácii daného zariadenia, rovnako ako aj spôsob riešenia týchto problémov.

# 1. PLAZMA

Plazma je podľa práce [8] pomenovanie hmoty, ktorá obsahuje veľké množstvo voľných elektrónov a ionizovaných molekúl alebo atómov popri čom musí spĺňať dané podmienky.

Platí, že plazma je kvazineutrálna a jej častice vykazujú kolektívne chovanie [1]. Kvazineutralita znamená, že daná hmota má nulový náboj, pretože veľkosť kladného a záporného náboja sa rovnajú [8]. Kolektívne chovanie hovorí o tom, že nabité častice pri svojom pohybe vytvárajú vo svojom okolí elektrické pole [1]. Tieto polia potom ovplyvňujú pohyb ďalších, vzdialenejších častíc. Kolektívne chovanie teda popisuje pohyb častíc, ktorý je závislý nielen od lokálnych podmienok, ale taktiež na stave častíc hmoty vo vzdialenejších miestach [1].

## 1.1 Delenie plazmy

Aj napriek tomu, že plazmu možno kategorizovať pomocou viacerých kritérií, v literatúre sa najčastejšie vyskytuje delenie podľa teploty (ako formy energie) [4]. Plazma je hmota, v ktorej častice navzájom nemusia byť v teplotnej rovnováhe [1], rozlišujeme medzi nízkoteplotnou (netermickou) plazmou a vysokoteplotnou (termickou) plazmou [4].

### 1.1.1 Nízkoteplotná plazma

Elektróny nízkoteplotnej plazmy majú podstatne vyššiu teplotu ako ióny [4]. Tento stav je možné dosiahnuť tým, že frekvencia zrážok iónov medzi sebou a elektrónov medzi sebou je vyššia ako frekvencia zrážok medzi iónmi a elektrónmi navzájom [1]. Tento typ plazmy sa môže vyrábať za extrémne nízkych tlakov - vo vákuových komorách, ale aj pri normálnom atmosférickom tlaku [5]. Na výrobu sa používa vysokofrekvenčná technika alebo jednosmerný zdroj [5]. Má široké využitie v priemysle k úprave povrchov, v medicíne na liečenie rán a dezinfekciu (plasma pen) a pri liečbe rakoviny [4], [2].

### 1.1.2 Vysokoteplotná plazma

Elektróny majú rovnakú teplotu ako ióny [4]. Tento typ plazmy sa vyrába pri vysokom tlaku ( $>10 \text{ kPa} \rightarrow 0.1 \text{ bar}$ ) a výroba plazmy môže byť sprostredkovaná pomocou zdroja jednosmerného prúdu, striedavého prúdu alebo pomocou vysokofrekvenčnej techniky [5]. Používa sa k likvidácii nebezpečného/ toxického odpadu a k výrobe ochranných povrchov - napríklad anti-korozívneho povrchu ktorý sa realizuje ako potiahnutie kovových predmetov keramickým alebo kovovým filmom, ktorý sa v podobe prášku roztaví v plazmovej komore [5]. Rovnako má svoje uplatnenie v priemysle v aplikáciách rezania a zvarovania materiálov [4].

## 1.2 Dôležité parametre plazmy

### 1.2.1 Debye-eho tienenie

Pri zavedení pojmu kolektívne chovanie plazmy bolo spomenuté, že nabité častice plazmy dokážu svojím elektrickým polom ovplyvňovať iné, vzdialenejšie častice [1]. Vzdialenosť, na ktorú nabitá častica dokáže ovplyvniť inú časticu, sa označuje ako Debye-eho dĺžka [8].

Debye-eho dĺžku dokážeme vypočítať podľa [8] vzťahom

$$\lambda_D = \left( \frac{\varepsilon_0 * k * T}{n_e * q_e^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1)$$

kde  $\lambda_D$  je debye-eho dĺžka,  $\varepsilon_0$  permitivita vákua,  $k$  Boltzmanova konštanta,  $T$  teplota v kelvinoch,  $n_e$  hustota elektrónov,  $q_e$  náboj elektrónu.

Platí, že nabité častice plazmy sú rozložené tak, aby tienili všetky elektrostatické polia, ktoré sú vo vzdialenosti rádovo zodpovedajúcej Debye-eho dĺžke [8]. Ak by sme teda do plazmy vložili časticu s nábojom, častice plazmy s opačným nábojom ako má táto vložená častica by zaistili, aby bol daný náboj odtienený [1].

### 1.2.2 Frekvencia plazmy

Frekvencia plazmy je podľa [8] udávaná vzťahom

$$\omega_{pe} = \left( \frac{n_e * q_e^2}{m_e * \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2)$$

kde  $\omega_{pe}$  je uhlová frekvencia plazmy,  $\varepsilon_0$  permitivita vákua,  $m_e$  hmotnosť elektrónov,  $n_e$  hustota elektrónov,  $q_e$  náboj elektrónu.

Vidno, že v tomto vzťahu sa vyskytujú iba vlastnosti elektrónov. Je to preto, pretože rýchlosť ostatných častíc v plazme je podstatne menšia ako rýchlosť elektrónov, tj. na frekvenciu plazmy majú najväčší vplyv práve elektróny [8]. V určitých literatúrach [8] sa označuje ako elektrónová frekvencia plazmy. Túto frekvenciu samozrejme ovplyvňujú zrážky rýchlych elektrónov s pomalšími neutrálnymi časticami [8]. Jednou z kritérií definovania plazmy je, že pre strednú dobu medzi zrážkami elektrónov s neutrálnymi atómami  $\tau$  a frekvenciou plazmy  $\omega_{pe}$  platí podľa [8] vzťah

$$\omega_{pe} * \tau > 1, \quad (1.3)$$

kde  $\omega_{pe}$  je uhlová frekvencia plazmy,  $\tau$  stredná doba medzi zrážkami.

Ak táto podmienka nie je splnená, prostredie sa chová skôr ako neutrálny plyn než ako plazma [1]. Na to, aby bol splnený vzťah (1.3), musí platiť, aby bola frekvencia zrážok elektrónov s neutrálnymi časticami nižšia ako samotná frekvencia plazmy [8]

$$f_{en} > f_{pe} , \quad (1.4)$$

kde  $f_{pe}$  je frekvencia (elektrónov) plazmy,  $f_{en}$  frekvencia zrážok elektrónov a neutrálnych častíc.



## 2. SPÔSOBY GENEROVANIA PLAZMY

Spôsob výroby plazmy je závislý od požadovaných vlastností plazmy [9]. Platí teda, že univerzálny zdroj plazmy, ktorý by generoval plazmu pre širokú škálu aplikácií, neexistuje [4].

V laboratórnych podmienkach sa plazma najčastejšie generuje

1. Fotoionizačným procesom- pri tomto procese vznikajú ióny pôsobením fotónov. Tento proces je príznačný pre tvorbu plazmy vo vesmíre. Plazmu je však možné týmto procesom vyrobiť aj v laboratórnych podmienkach, bližšie sa tým zaoberá autor textu [10],
2. Pomocou elektrických výbojov v plynoch- výboje prebiehajú medzi dvomi elektródami za vzniku vysokej teploty [4].

Ďalej sa budeme zaoberať iba výrobou plazmy pomocou elektrických výbojov v plynoch.

### 2.1 Výroba plazmy pomocou elektrických výbojov v plynoch

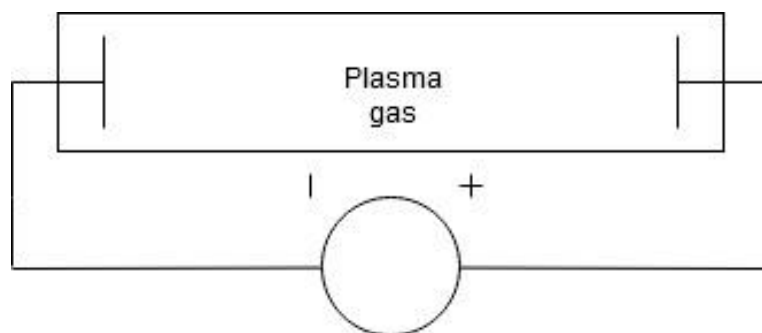
Jedná sa o najčastejší spôsob generovania plazmy v laboratórnych podmienkach. Generátor môže pracovať v spojitom alebo impulznom režime, v závislosti od elektrického poľa, ktoré môže byť jednosmerné alebo striedavé [2]. Pri striedavom elektrickom poli môže generátor pracovať na rôznych frekvenciách. Sieťovej frekvencii, nízkych frekvenciách (rádovo kHz), vysokých frekvenciách (1-100 MHz), alebo na frekvenciách mikrovln (jednotky GHz) [2].

V praxi najpoužívanéjšie frekvencie sú  $f = 13.56$  MHz a  $f = 27.12$  MHz. Jedná sa o ISM (industrial, scientific and medical) frekvencie, ktoré je možné používať bez potreby licencie v celom svete [7].

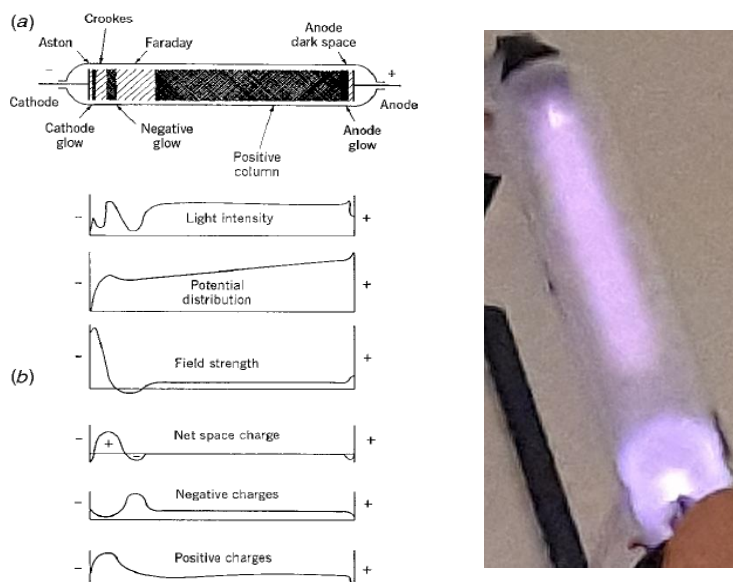
#### 2.1.1 Jednosmerný tlejivý výboj (DC glow discharge)

Najjednoduchším spôsobom generovania plazmy je jednosmerný tlejivý výboj. Jedná sa o spôsob generovania nízkoteplotnej plazmy [4]. Katóda a anóda sa nachádzajú v uzavretej komore napustenej pracovným plynom a sú pripojené na jednosmerný zdroj napätia [2]. Intenzita elektrického poľa pôsobí na elektróny plynu a tie sú urýchľované. So zvyšujúcou sa rýchlosťou elektrónov narastá aj počet nepružných kolízií medzi časticami plynu, narastá teplota a vzniká ionizácia plynu [4]. Pri ionizácii plynu vznikajú ióny, tie sú urýchľované ku katóde na ktorej rekombinujú, zrážkami v okolí katódy sa uvoľňujú ďalšie voľné elektróny a vzniká výboj [11]. Veľkým počtom zrážok je zvýšená šanca, že sa z atómov odtrhnú ďalšie voľné elektróny. Tento proces sa nazýva sekundárna emisia [11]. Elektróny sú akcelerované elektrickým polom k anóde. Plazma vyrobená týmto procesom sa používa napríklad ako zdroj svetla v prípade, ak je komora s pracovným plynom zo skla- neónové trubice, tlejivky [4]. Používa sa aj v priemysle pri

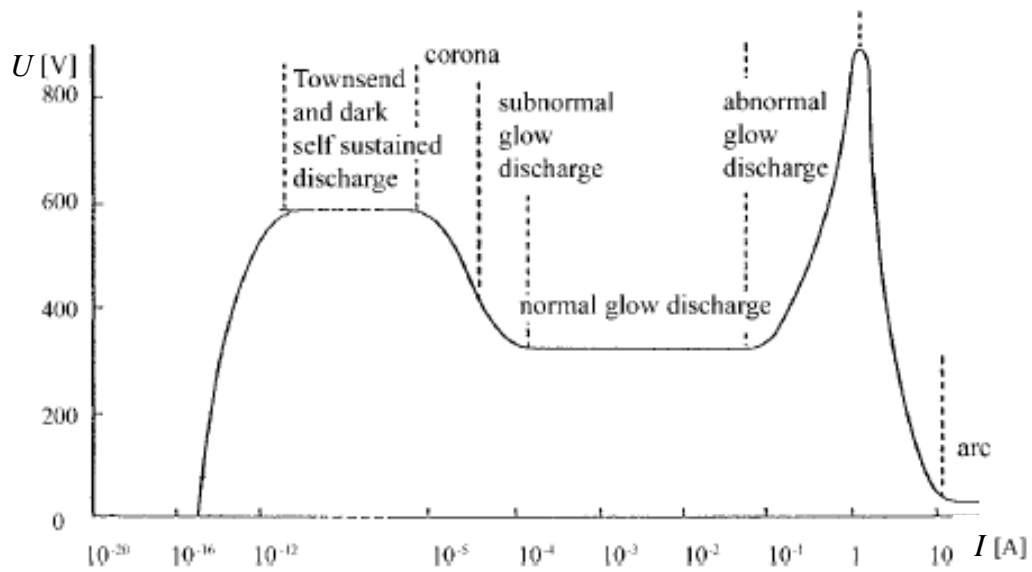
úprave povrchov napríklad naprašovaním [4]. Generovanie plazmy pomocou tlejivého výboju môžeme kategorizovať na viacero typov podľa veľkosti napätia a prúdu, ktoré sú zdrojom do komory dodávané. Jedná sa o Townsendov výboj, ten vznikne pri rekombinácii iónov a sekundárnej emisii elektrónov, subnormálny tlejivý výboj, normálny tlejivý výboj a abnormálny tlejivý výboj [2].



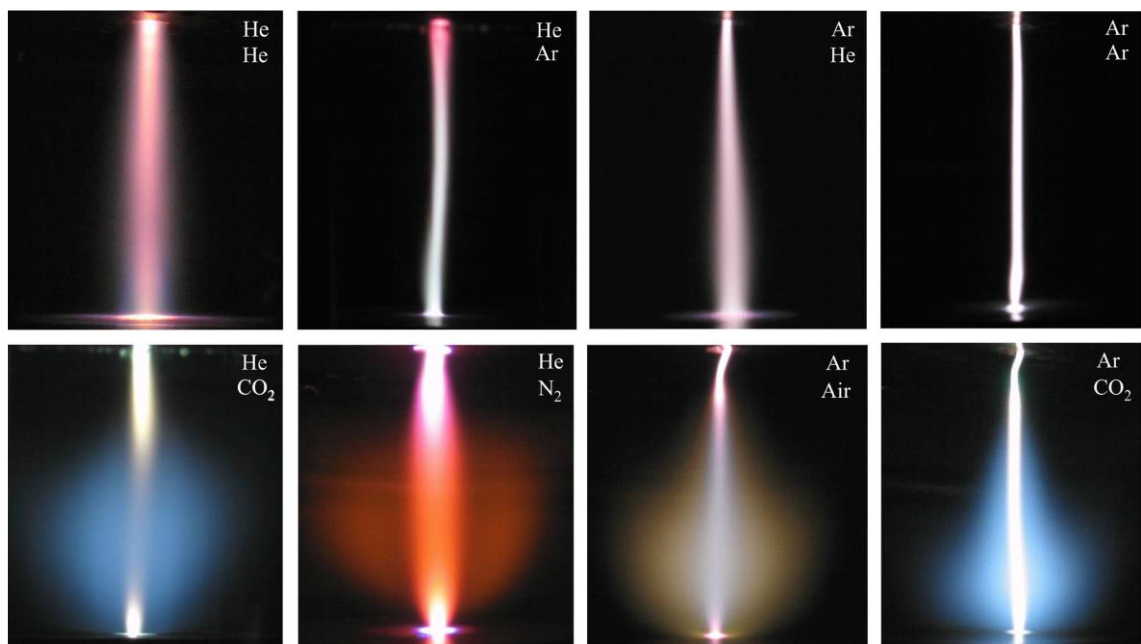
Obrázok 2.1 Zjednodušené zobrazenie situácie výroby plazmy pomocou jednosmerného tlejivého výboju, prevzaté a upravené z [4].



Obrázok 2.2 Parametre produkovanej plazmy vo vyznačených častiach komory (vľavo), prevzaté z [9] a ukážka výboju v plazmovej komore (vpravo).



Obrázok 2.3 Volt-ampérová charakteristika pre jednotlivé typy tlejivých DC výbojov, prevzaté a upravené z [2], [3].



Obrázok 2.4 Farby a tvary jednotlivých výbojov pre rôzne plyny použité v komorách, prevzaté z [12].

Z obrázku 2.4 je zjavné, že farba a tvar výbojov závisí od zloženia plynu, ktorý sa v komore nachádza.

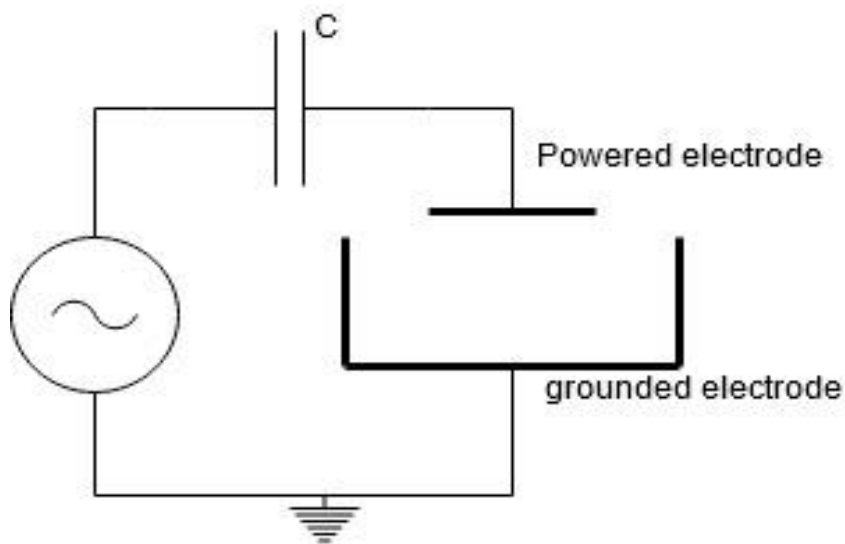
### 2.1.2 Vysokofrekvenčný výboj (RF discharge)

Pri generovaní plazmy vysokofrekvenčným výbojom sa používa generátor s pracovnou frekvenciou v rozsahu 1 kHz-103 MHz, najčastejšie však  $f = 13.56$  MHz a  $f = 27.12$  MHz [4]. Plazma vyrábaná vysokofrekvenčným výbojom môže mať charakter kapacitne viazanej plazmy (CCP) alebo induktívne (ICP) viazanej plazmy [4]. Nakoľko sa pohybujeme na poli vysokofrekvenčnej techniky, musíme klásť veľký dôraz na impedančné prispôsobenie generátoru a plazmovej komory pre zabránenie vzniku odrazených vln [13].

#### 2.1.2.1 Kapacitne viazaná plazma (CCP)

Pri výrobe CCP je systém tvorený generátorom a komorou, v ktorej sa nachádzajú dve elektródy [4]. Jedna z elektród je uzemnená a druhá je pripojená k striedavému (VF) zdroju napätia [4]. Princíp činnosti je založený na vytvorení plazmy pomocou premenného elektrického poľa aplikovaného medzi elektródami [14]. Elektródy sú od seba vo väčšine prípadov vzdialené pár centimetrov [2]. Na výrobu kapacitne viazanej plazmy sa najčastejšie používa generátor pracujúci na frekvencii  $f = 13.56$  MHz s výstupnou impedanciou  $Z_{out} = 50 \Omega$  [9]. Kapacitne viazaná plazma môže existovať v dvoch formách, a to

1.  $\alpha$ - v tejto forme prechádza plazmou menší prúd [2],
2.  $\gamma$ - v tejto forme prechádza plazmou väčší prúd [2].

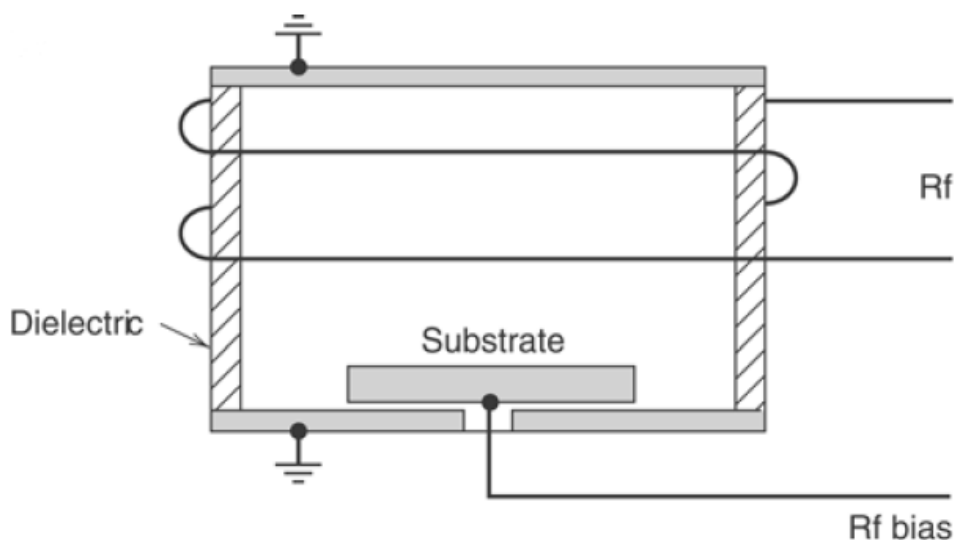


Obrázok 2.5 Zjednodušené znázornenie systému pre výrobu kapacitne viazanej plazmy, prevzaté z [4].

#### 2.1.2.2 Indukčne viazaná plazma (ICP)

Pri tomto systéme úplne neplatí to, čo bolo povedané na začiatku kapitoly o generovaní plazmy. V tomto prípade nie je totiž plazma generovaná medzi dvoma elektródami [14].

Pri ICP je špeciálna cievka napájaná z vysokofrekvenčného zdroja a preteká ňou elektrický prúd, ktorý vytvára zmenu magnetického toku [4]. Táto zmena magnetického toku vyvolá indukovanie vysokofrekvenčného poľa v plazmovej komore a spôsobuje urýchľovanie elektrónov a vytváranie výbojov [4]. Cievka môže byť umiestnená priamo v plazmovej komore alebo mimo nej [2]. Častejším riešením je však umiestnenie cievky mimo komoru, naznačené daného systému je na obrázku 2.6. Obrovskou výhodou tohto systému je, že plazma nie je znečisťovaná materiálom z elektród [14].

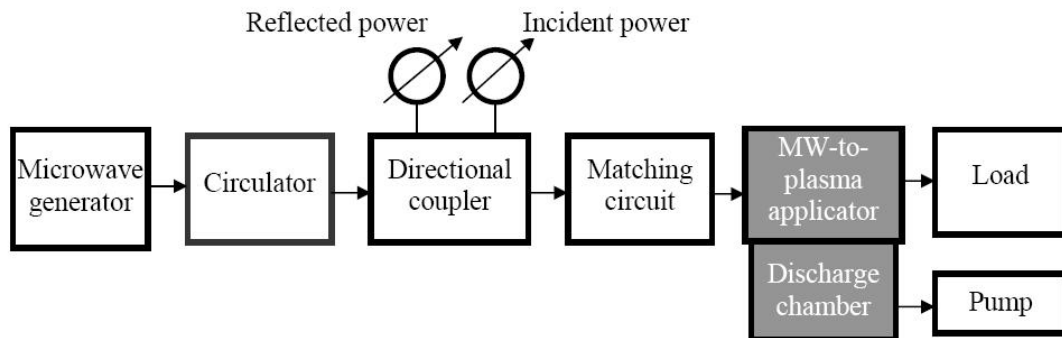


Obrázok 2.6 Zjednodušené znázornenie systému pre výrobu indukčne viazanej plazmy, prevzaté z [9].

### 2.1.3 Mikrovlnný výboj (Microwave discharge)

Generátor najčastejšie pracuje na frekvencii  $f = 2.45 \text{ GHz}$  [2] a môže pracovať ako v spojitom, tak v spínanom režime.

Systém na výrobu mikrovlnnej plazmy pozostáva z generátoru pracujúceho na frekvencii mikrovĺn (napríklad magnetrónu), jednotky ktorá chráni generátor pred odrazenými vlnami (angl. circulator), smerovej odbočnice (angl. directional coupler), obvodu impedančného prispôsobenia (matching circuit) a zvolenej plazmovej komory [15]. Bloková schéma je znázornená na obrázku 2.7.



Obrázok 2.7 Bloková schéma systému na výrobu plazmy mikrovlnným výbojom, prevzaté z [15].

V práci [15] sa autor dôkladnejšie zaoberá jednotlivými koncepciami systémov produkujúcich plazmu pomocou mikrovĺn.

Physics	Pressure (mbar)	$n_e$ (cm <sup>-3</sup> )	$T_e$ (eV)	Bias	Application
Dc glow	10 <sup>-3</sup> –100				
cathode region			100	Yes	Sputtering, deposition, surface elementary
negative glow		10 <sup>12</sup>	0.1	No	Chemistry, radiation
positive column		10 <sup>11</sup>	1–10	No	Radiation
hollow cathode	10 <sup>-2</sup> –800	10 <sup>12</sup>	0.1	No	Radiation, chemistry
magnetron	10 <sup>-3</sup>			Yes	Sputtering
Arc, hot cathode					
external heating low voltage	1	10 <sup>11</sup>	0.1	No	Radiation
internal heating	1000	10 <sup>13</sup>	0.1	No	Radiation welding
Focus	10		keV		Radiation
Rf capacitive					
low pressure	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-1</sup>	10 <sup>11</sup>	1–10	Yes	Processing, sputtering
moderate pressure	10 <sup>-1</sup> –10	10 <sup>11</sup>	1–10	No	Processing, deposition
hollow cathode	1	10 <sup>12</sup>	0.1	No	Processing, radiation
magnetron	10 <sup>-3</sup>			Yes	Sputtering
Rf inductive	10 <sup>-3</sup> –10	10 <sup>12</sup>	1	No	Processing, etching
helicon	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-2</sup>	10 <sup>13</sup>	1	No	Processing
MW					
closed structure	1000	10 <sup>12</sup>	3	No	Chemistry
SLAN	1000	10 <sup>11</sup>	5	No	Processing
open structure					
surfatron	1000	10 <sup>12</sup>	5	No	Processing
planar	100	10 <sup>11</sup>	2	No	Processing
ECR	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>12</sup>	5	No	Processing
Electron beam					
BPD	10 <sup>-2</sup> –1	10 <sup>12</sup>	1	No	Processing
Dielectric barrier discharge	1000	10 <sup>14</sup>	5	No	Ozone, processing chemistry

Obrázok 2.8 Jednotlivé princípy generovania plazmy s parametrami a využitím v praxi, prevzaté z [2].

### 3. MERANIE V PLAZMOVÝCH KOMORÁCH

Pre zabezpečenie správneho chodu elektronického výkonového generátoru je potrebné merať parametre vyrábanej plazmy v reálnom čase [24]. Merajú sa parametre ako hustota a teplota elektrónov, potenciál plazmy, teplota iónov, koncentrácia nečistôt, intenzita magnetického poľa, atď. [16].

Na zariadenia určené pre meranie parametrov plazmy sú kladené veľké, hlavne konštrukčné nároky. V prípade meracích sond, ktoré sú umiestnené v plazmovej komore a prichádzajú s plazmou do priameho styku sú kladené špeciálne nároky na schopnosť odolávať vysokým teplotám [24]. Určité parametre tiež majú široký rozptyl hodnôt, takže sú kladené požiadavky na široký merací rozsah [24]. Metódy na meranie parametrov plazmy možno rozdeliť na

1. Aktívne- plazma je vystavená vonkajším zdrojom vln za účelom diagnostiky. Patria sem napríklad: interferometria, reflektometria [16],
2. Pasívne- napríklad spektrometria a merania magnetického poľa [16].

Pomerne precízne sú spracované vhodné metódy diagnostiky plazmy pre dané rozsahy meraných parametrov v literatúre [24] v sekcii tabuliek na konci dokumentu.

#### 3.1 Meranie magnetického poľa

Pre účely práce sú zaujímavé merania parametrov magnetického poľa vo vnútri plazmovej komory pomocou sond a cievok [44], [20]. Meranie pomocou cievok je považované za najjednoduchšie meranie parametrov plazmy.

Pomocou cievky meriame magnetické pole buď priamo v plazmovej komore alebo mimo nej a parametre vyhodnocujeme na základe indukovaného napätia na cievke [16].

Parametre ktoré dokážeme vyhodnotiť sú napríklad plazmový prúd, energia plazmy, atď. [16].

Napätie indukované na cievke je podľa [16] vyjadrené ako

$$U = n * A * \frac{dB}{dt}, \quad (3.1)$$

kde  $U$  je napätie indukované na cievke,  $n$  počet závitov cievky,  $A$  plocha prierezu cievky,  $B$  magnetická indukcia.

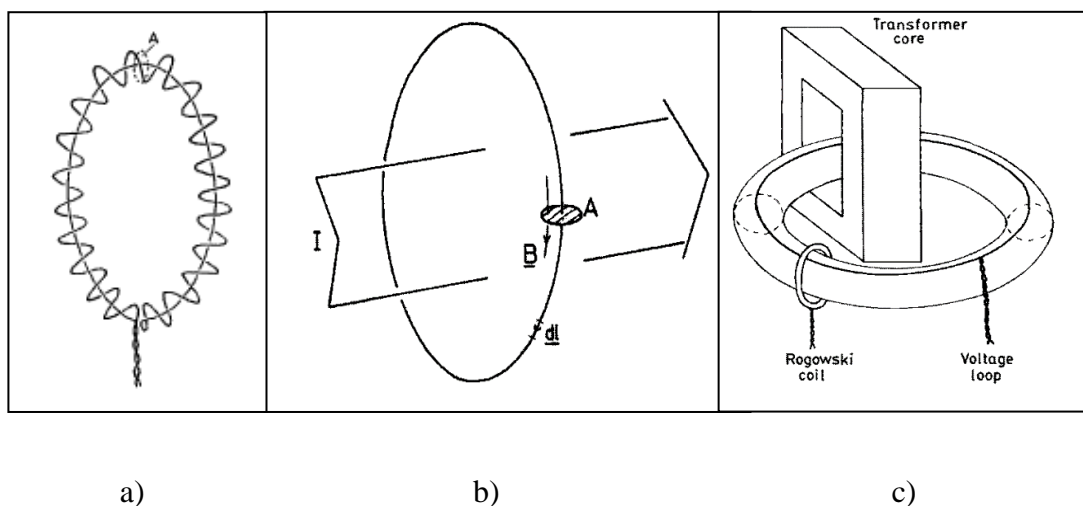
Napätie indukované na cievke zodpovedá časovej derivácii magnetického toku prechádzajúceho vnútom cievky [16].

##### 3.1.1 Rogowského cievka

Najčastejší typ cievky zvolenej pre meranie parametrov plazmy je Rogowského cievka [19].

Jedná sa o solenoid, ktorého konce sú spojené do kruhového prstenca tak ako je znázornené na obrázku 3.1a [16]. Je určená na meranie elektrického prúdu, pretekajúceho jej vnútom [16].

Táto cievka je navinutá na nevodivom jadre, toto zabraňuje nasýteniu jadra a umožňuje cievke pracovať ako lineárny prevodník v celom rozsahu [19]. Pri nevodivom jadre taktiež nedochádza k tvorbe nežiaducich vírivých prúdov vo vnútri jadra.



Obrázok 3.1 a) Znázornenie Rogowského cievky,  
b) Znázornenie toku magnetickej indukcie pri priechode prúdu vnútom cievky,  
c) Znázornenie použitia Rogowského cievky pre merania v tokamaku.  
Prevzaté z [16].

Výstupné napätie na tejto cievke je podľa [16]

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = n * A * \mu * \frac{dI}{dt}, \quad (3.2)$$

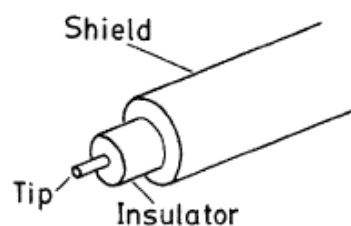
kde  $U$  je napätie na výstupe cievky,  $n$  počet závitov cievky,  $A$  plocha prierezu cievky,  $\mu$  permeabilita,  $I$  elektrický prúd pretekajúci vnútom cievky,  $\Phi$  magnetický tok.

## 3.2 Langmuirova sonda

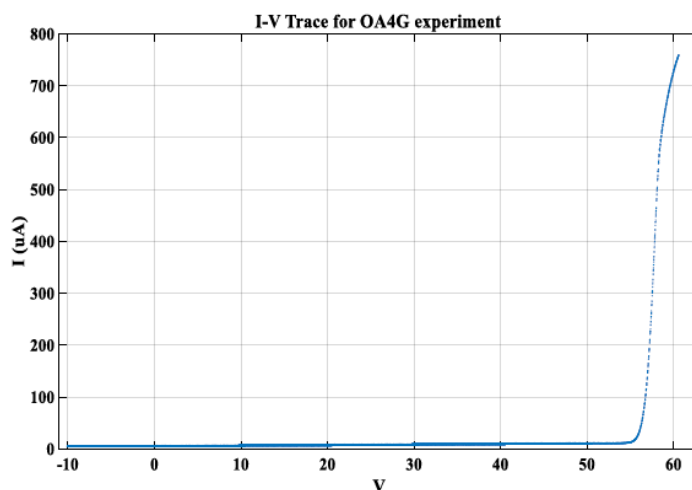
Jednou z prvých sond použitých k diagnostike plazmy je Langmuirova sonda [16]. Používa sa k meraniu toku častíc plazmy. Cievka je zvonku napájaná zdrojom napätia a výstupom merania je volt-ampérová charakteristika, z ktorej sa dajú vyčítať parametre plazmy [20]. Parametre ktoré sa dajú vyčítať z charakteristiky sú napríklad teplota a koncentrácia elektrónov, potenciál plazmy [16]. Konštrukcia takejto sondy je znázornená na obrázku 3.2.

Hrot (tip) je tvorený neizolovaným dráťom z volfrámu, alebo iného žiaruvzdorného materiálu [17]. Ako izolant (insulator) je väčšinou použitý oxid hlinitý. Umiestňuje sa medzi elektródy v plazmovej komore [17].





Obrázok 3.2 Konštrukcia Langmuirovej sondy, prevzaté z [16].

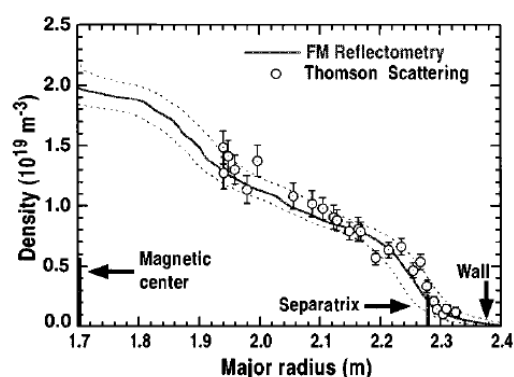


Obrázok 3.3 Ideálny priebeh V/A charakteristiky získanej pomocou Langmuirovej sondy, prevzaté z [20].

Návrhom a zostrojením Langmuirovej sondy sa ďalej zaoberá autor v literatúre [20].

### 3.2.1 Reflektometria

Je aktívna metóda, ktorá je založená na vystavení plazmy pôsobeniu vonkajších elektromagnetických vln [16]. Nakoľko je plazma vodivým prostredím, takéto vonkajšie vlny ňou môžu prechádzať [8]. Pri vložení vlny určitej frekvencie do prostredia plazmy je možnosť, že sa vlna na určitom mieste úplne odrazí, a tým pádom je možné jej následné zachytenie [16]. Úplný odraz vlny nastáva vtedy, keď sa v danom mieste hustota elektrónov rovná medznej hustote  $n_c$  [16]. Nakoľko frekvencia plazmy je závislá od koncentrácie častíc v plazme (teda od jej hustoty), možno danú skutočnosť využiť k diagnostike plazmy [16]. Meranými veličinami sú amplitúda a fázový posuv vlny [16].

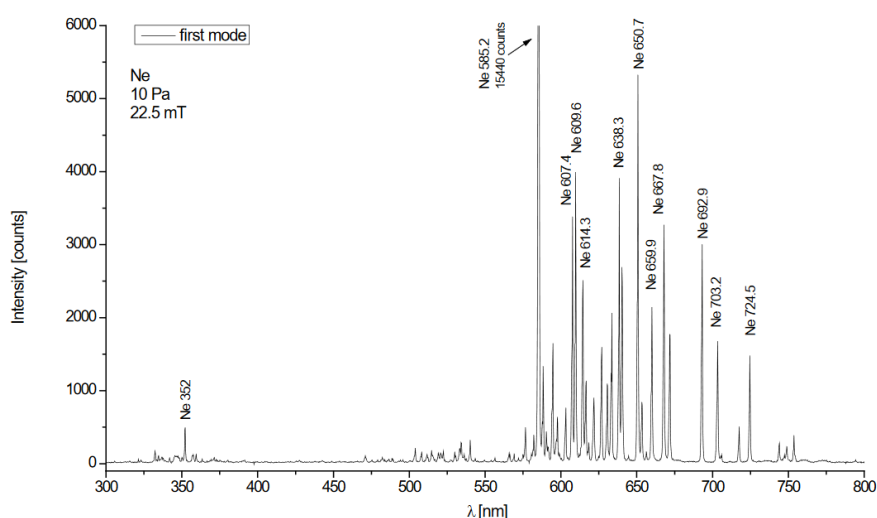


Obrázok 3.4 Porovnanie profilov hustoty plazmy získaných reflektometriou a Thomsonovým rozptylom- poukazujú na správnosť výsledku získaného pomocou reflektometrie, prevzaté z [16].

### 3.2.2 Spektroskopia

Spektroskopia je metóda pre získanie parametrov plazmy pomocou detegovania žiarenia plazmy [22]. Zistiť možno napríklad teplotu elektrónov a hustotu plazmy [22]. Vyhodnocuje sa žiarenie rôznych vlnových dĺžok, pri vyhodnocovaní viditeľného spektra žiarenia hovoríme o optickej emisnej spektroskopii [22]. V tomto prípade privádzame žiarenie cez okienko v plazmovej komore cez monochromatický člen na detektor. Vyhodnocovať ale taktiež možno napríklad röntgenové žiarenie (soft X-ray) [23].

Bližšie sa optickou emisnou spektrometriou v praxi zaoberá napríklad skupina autorov v literatúre [21] alebo skupina autorov v literatúre [22], kde je venovaný dôraz na bližší popis získavania parametrov plazmy zo spektrálnych čiar, ktoré sú výsledkom merania.



Obrázok 3.5 Pribeh získaný pomocou Optickej emisnej spektroskopie, prevzaté z [21].

## 4. RIEŠENIA GENERÁTOROV PRE PLAZMOVÉ KOMORY, $F = 13.56 \text{ MHz}$

Nakoľko sa zastúpenie plazmy v rôznych odvetviach stále zvyšuje, existuje viacero firiem, ktoré sa zaoberajú výrobou generátorov pre plazmové systémy. Ďalej sa budeme zaoberať iba elektronickým spôsobom generovania plazmy. Na trhu je viacero komerčne dostupných riešení od firiem ako napríklad Diener electronic [55] alebo Advanced energy [56]. Tie vyrábajú generátory pre rôzne frekvencie (ISM, mikrovlny) s výkonom od desiatok Watt-ov až po desiatky kiloWatt-ov. Tieto firmy si však princíp fungovania výkonových elektronických generátorov nechávajú samozrejme pre seba. Pre bližšie preskúmanie existujúcich koncepcií treba preto hľadať z iných zdrojov.

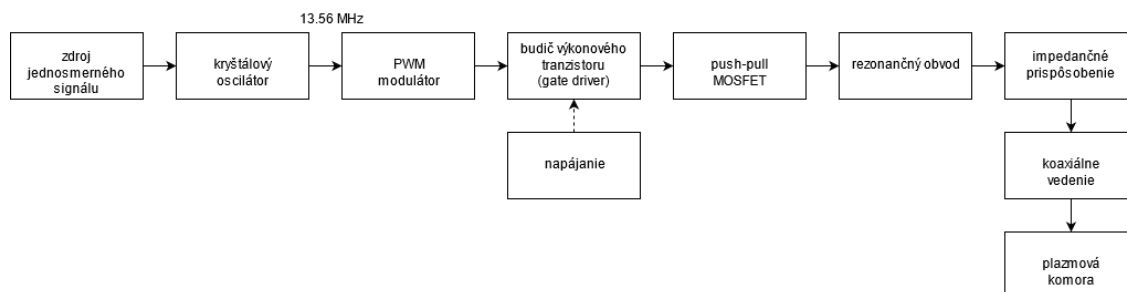
Firmy vyrábajúce vysoko-výkonové, vysokofrekvenčné tranzistory ponúkajú obvodové riešenia generátorov pracujúcich v ISM frekvenciách priamo pre svoje produkty v podobe aplikačných poznámok. Medzi takéto firmy patrí hlavne firma Microsemi (Microchip technology) [63] a firma IXYS (Littelfuse) [64]. Tieto firmy ponúkajú riešenia v podobe modulov pracujúcich ako zosilňovače v triede E a D ([34], [35]), ich princíp činnosti ďalej opíšem.

Nakoľko po akvizícii firmy IXYS firmou Littelfuse [65] zanikla divízia IXYS RF, ktorá sa zaoberala výrobou práve takýchto tranzistorov, ich riešenia nemožno využívať v plnej podobe ako boli navrhnuté, použité súčiastky sa už nevyrábajú.

Vo všetkých dostupných riešeniach sa jedná o generátory s harmonickým výstupom budiaceho signálu pre generovanie plazmy.

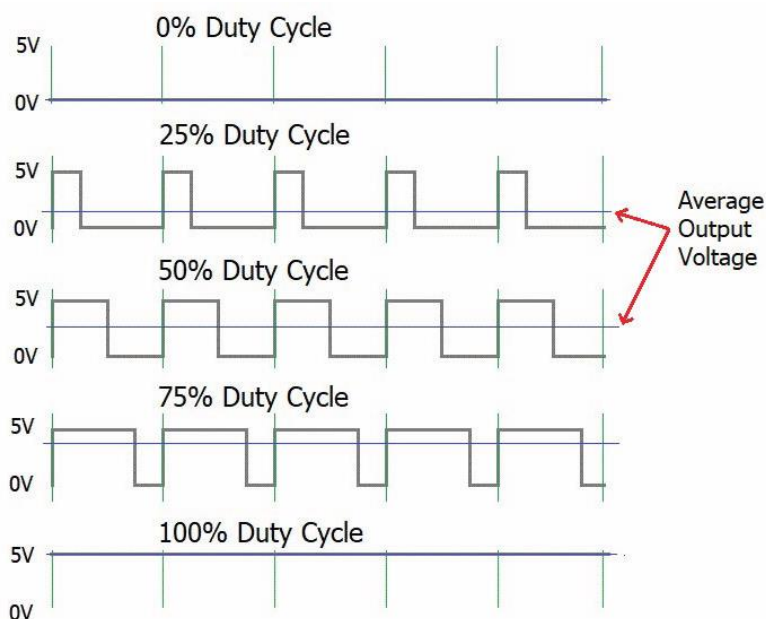
### 4.1 Jednotka PRF-1150

Modul PRF-1150 [34] je jedno z dostupných riešení plazmového generátoru od firmy IXYS [34]. Daný modul je zosilňovačom pracujúcim v triede E [51]. Daná jednotka je schopná dodávať výkon do veľkosti  $P_{out} = 1 \text{ kW}$  a záťaž napája sínusovým signálom na frekvencii  $f = 13.56 \text{ MHz}$  [34]. Zjednodušený blokový diagram daného modulu je zobrazený na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1 Zjednodušený blokový diagram generátoru firmy IXYS.

Toto riešenie (podľa aplikačnej poznámky [34]) vyžaduje napájanie modulu pomocou zdrojov jednosmerného napätia a to  $U_{n1} = 5\text{ V}$  ako zdroj pre kryštálový oscilátor,  $U_{n2} = 15\text{ V}$  ako zdroj pre budič gate elektródy výkonového tranzistoru a  $U_t = 0\text{--}300\text{ V}$  aplikovaného medzi Drain a Source elektródou použitého výkonového stupňa pre nastavenie veľkosti výstupného výkonu dodaného do elektrickej záťaže Z. Vstupná časť jednotky potom pozostáva z kryštálového generátoru, ktorý vstupný signál rozkmitá na frekvenciu  $f_0 = 13.56\text{ MHz}$  so striedou  $T_1/T_2 = 50:50$  a jednoduchého PWM modulátoru realizovaného klopným obvodom typu D. Takouto PWM reguláciou je zabezpečená zmena striedy signálu a tým možnosť riadiť šírku pulzu do budiča výkonového tranzistoru, znázornenie zmeny striedy pomocou PWM modulácie je na obrázku 4.2.

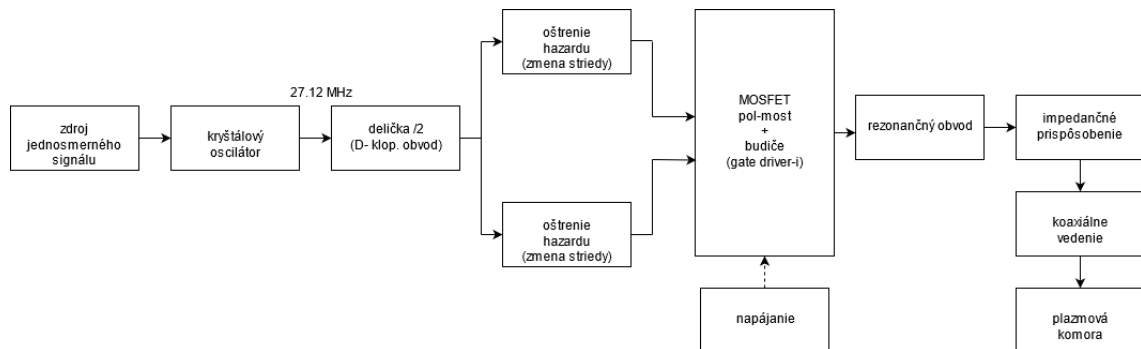


Obrázok 4.2 Zmena striedy signálu, prevzaté z [46].

Nasleduje výkonová časť modulu. Budič gate elektródy výkonového tranzistoru (gate driver) je vlastne prúdové posilnenie pre daný MOSFET výkonový tranzistor, zaisťujúci dostatočný elektrický prúd do vstupu (gate) elektródy tranzistoru. Ako výkonový stupeň bol v riešení firmy IXYS použitý jeden push-pull modul, dva tranzistory uzavreté v jednom puzdre. Tento tranzistor potom spína voči referenčnému potenciálu (zemi). Za výkonovým tranzistorom sa nachádza časť obvodu zabezpečujúca prácu zosilňovača v E triede, ďalej rezonančný obvod, ktorý zabezpečuje rozkmitanie obdĺžnikového signálu. Za týmto rezonančným obvodom sa už nachádza len obvod zabezpečujúci impedančné prispôbenie vo vyhotovení „L-match“ [13]. Celý modul je možné chladieť vzduchom (nútené chladenie) a podľa výrobcu dosahuje účinnosti na úrovni  $\eta = 80\text{--}85\%$  v závislosti na veľkosti použitého napätia medzi elektródou Drain a Source MOSFET tranzistoru [34].

## 4.2 Zosilňovač v triede D, MICROSEMI

Firma MICROSEMI [63] ponúka množstvo zapojení pre realizáciu generátorov pracujúcich v ISM frekvenciách. Využívajú pri tom svojich pol-mostových poprípade mostových zapojení tranzistorov spolu s budičmi gate elektródy v jednom puzdre (princiipiálne je pol-mostové zapojenie tranzistorov znázornené na obrázku 7.4 a mostové zapojenie na obrázku 7.5). Zjednodušený blokový diagram diskutovaného modulu [35] je zobrazený na obrázku 4.3.



Obrázok 4.3 Zjednodušený blokový diagram generátoru firmy Microsemi.

Daný modul je zosilňovačom pracujúcim v triede D [51]. Toto riešenie (podľa aplikačnej poznámky [35]) vyžaduje napájanie modulu pomocou zdrojov jednosmerného napätia  $U_{n1} = 14 \text{ V}$  pre napájanie oscilátoru a ďalších súčiastok zabezpečujúcich úpravu budiaceho signálu,  $U_{n2}$  a  $U_{n3} = 11.6 \text{ V}$  ako zdroj pre budiče gate elektród výkonových tranzistorov a  $U_t = 0-300 \text{ V}$  aplikovaného medzi Drain a Source elektródami použitých výkonových stupňov pre nastavenie veľkosti výstupného výkonu dodaného do elektrickej záťaže  $Z$ . Vstupná časť jednotky potom pozostáva z kryštálového oscilátoru, ktorý vstupný signál rozkmitá na frekvenciu  $f_0 = 27.12 \text{ MHz}$  so striedou  $T_1/T_2 = 50:50$ . Následne je signál rozdelený na polovicu pomocou deličky tvorenej D klopným obvodom. Toto zabezpečí vytvorenie 2 signálov s frekvenciou  $f = 13.56 \text{ MHz}$ , jedného s posuvom  $0^\circ$  a druhého otočeného o  $180^\circ$ . Následne je použitý PWM modulátor na úpravu šírky impulzu, aby sa predišlo hazardným stavom pri buzení koncových tranzistorov [45]. Tento modulátor je znova realizovaný pomocou D- klopného obvodu. Nasleduje impedančné oddelenie výkonovej časti modulu, ktoré bolo v tomto prípade realizované pomocou impulzného transformátoru [39]. Signál postupuje do budičov gate elektród koncových výkonových tranzistorov, ktoré sú spolu s MOSFET výkonovými tranzistormi integrované v jednom čipe. Budiče sú napájané externými izolovanými zdrojmi ( $U_{n2}$  a  $U_{n3}$ ). Za výstupom tranzistorov sa nachádza rezonančný obvod pre rozkmitanie signálu a impedančné prispôsobenie vo vyhotovení „L-match“ [13]. Celý modul je potrebné chladiť vodou a podľa výrobcu dosahuje účinnosti na úrovni  $\eta > 85\%$  [35].

## 5. ROZBOR ZADANIA

Pred zahájením návrhu výkonového elektronického generátoru pre plazmovú komoru je požadované oboznámenie sa s koncepciou a funkciou cieľovej plazmovej komory. Taktiež je potrebné rešpektovať požadované parametre dané zadávateľom práce. V tomto texte bližšie priblížim požiadavky na generátor vyplývajúce z daných aspektov.

### 5.1 Cieľová plazmová komora

Pre návrh výkonového generátoru je dôležitým parametrom hodnota vstupnej impedancie cieľovej plazmovej komory, od ktorej sa ďalej odvíja napr. návrh minimalizácie odrazenej EMG vlny generátor/komora. Hodnoty meranej vstupnej impedancie boli zadané zadávateľom práce a sú korešpondujúce s určitým nastavením plazmovej komory (tá sa skladá z laditeľných prvkov a prestavením možno čiastočne zmeniť vstupnú impedanciu).

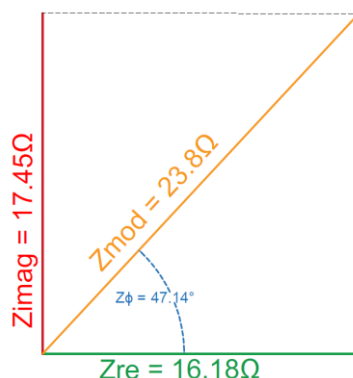
Uvažovaná plazmová komora s daným nastavením má parametre vstupnej impedancie určené ako

$$Z_{re} = 16.18 \, \Omega,$$

$$Z_{imag} = 17.45 \, \Omega,$$

$$Z_{mod} = 23.80 \, \Omega,$$

$$Z_{\phi} = 47.14^{\circ}.$$



Obrázok 5.1 Obraz impedancie plazmovej komory v komplexnej rovine.

Pre relevantné výsledky simulácií zvoleného riešenia výkonového generátoru treba vytvoriť z daných parametrov náhradný model plazmovej komory.

Z týchto parametrov možno v praxi dopočítať adekvátnu náhradu v podobe RLC obvodu [47]. K výpočtu náhrady použijem parametre  $Z_{mod}$  a  $Z_{\phi}$ . Ako možno vidno, parameter  $Z_{imag}$  má kladnú hodnotu. To znamená, že plazmová komora má indukčný charakter. Pokúsim sa teda najprv o určenie náhradnej schémy v podobe sériového RL obvodu. K výpočtu možno použiť vzťah

$$Z = R + j\omega L, \quad (5.1)$$

kde  $Z$  je elektrická impedancia,  $R$  elektrický odpor,  $\omega$  uhlová frekvencia,  $L$  indukčnosť.

Ako vhodnú hodnotu rezistoru  $R$  volím  $R = Z_{re} = 16.18 \, \Omega$ . Zostáva dopočítať indukčnosť použitej cievky  $L$ . Po vyriešení rovnice 6.2 možno hodnotu indukčnosti cievky určiť ako  $L = 204.7 \, \text{nH}$ . Po spätnom spočítaní elektrickej impedancie  $Z$  daného RL obvodu zistíme, že  $Z_{mod} = 23,789 \, \Omega$  a  $Z_{\phi} = 47,147^\circ$ . Toto je minimálny rozdiel od nameraných hodnôt, preto tvorbu náhradného RLC obvodu nepovažujem za potrebnú a budem náhradný sériový RL obvod považovať za adekvátnu náhradu plazmovej komory.

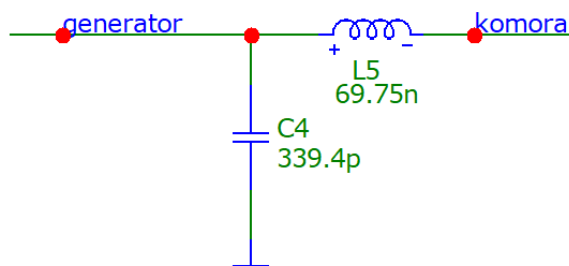


Obrázok 5.2 Náhradný obvod plazmovej komory.

## 5.2 Prispôbovací člen komora/generátor

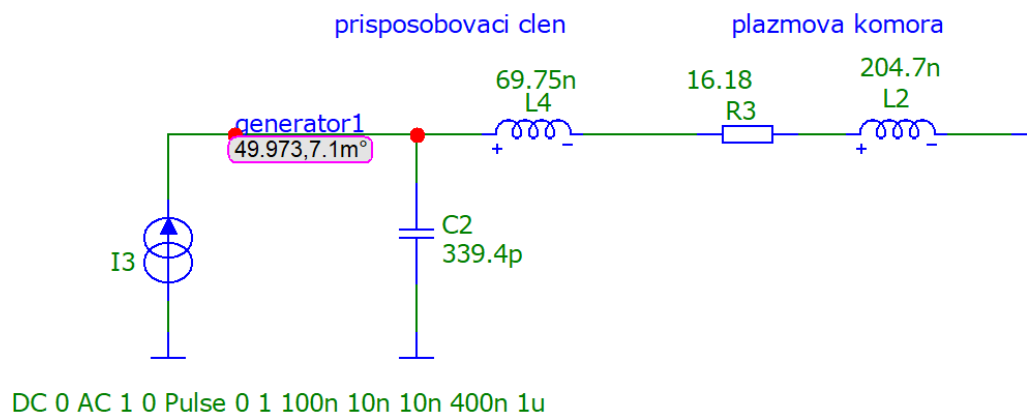
Medzi výstup výkonového generátoru a vstup plazmovej komory sa v praxi vkladá prispôbovací člen, ktorý upraví vstupnú impedanciu  $Z$  (pre prvú harmonickú) plazmovej komory tak, aby sa jej vstupná elektrická impedancia javila ako  $Z = 50 \, \Omega$  iba s reálnym charakterom [27]. Stav, kedy sa elektrická impedancia  $Z$  bude javiť ako čiste reálna bude dosiahnutý pri stave kompenzácie indukčného charakteru (pre zadané nastavenie cieľovej plazmovej komory) komory charakterizovaného cievkou  $L1$  (náhradný obvod plazmovej komory, obrázok 5.2)

Náhradná schéma prispôbovacieho členu je na obrázku 5.3:



Obrázok 5.3 Náhradný obvod prispôbovacieho členu generátor/plazmová komora.

Hodnotu vstupnej impedancie plazmovej komory upravenej pomocou tohto prispôsobovacieho člena možno overiť pomocou jednoduchkej simulácie s prúdovým zdrojom uvedenej na obrázku 5.4.



Obrázok 5.4 Náhradný obvod pre stav prispôsobenia plazmovej komory.

Výsledkom simulácie zobrazenej na obrázku 5.4 bola overená podoba výslednej elektrickej impedancie  $Z$  plazmovej komory s prispôsobovacím obvodom (pre prvú harmonickú budiaceho signálu  $f = 13.56$  MHz). Výsledná zložka  $Z_{mod} = 49.97 \, \Omega$  a  $Z_\phi = 7.1 \cdot 10^{-3} \, \Omega$ .

Ako už bolo v texte spomenuté, nastavenie cieľovej plazmovej komory sa môže meniť, taktiež impedancia plazmovej komory sa mení v závislosti na stave plazmy [18]. Z toho vyplýva požiadavka na možnosť ladit' jednotlivé prvky prispôsobovacieho člena.

Výsledky zhrnuté v tomto texte vedú na možnosť použiť pri simuláciách koncového riešenia odpor  $R = 50 \, \Omega$  (ako elektrickú impedanciu  $Z$  s čiste reálnou zložkou), ktorý bude predstavovať elektrickú záťaž v podobe plazmovej komory s prispôsobovacím členom.

### 5.3 Požadované parametre konštruovaného generátoru

Cieľom práce je vytvoriť výkonový generátor, ktorý okrem iného musí splniť požiadavky vyplývajúce z režimu a funkcie plazmovej komory, pre ktorú bude použitý. Požiadavky na výsledný modul generátoru som zhrnul ako

1. Optimálna miniaturizácia DPS pri zachovaní funkčnosti modulu generátoru,
2. Výber vhodného výkonového tranzistoru a jeho budiču gate elektródy,
3. Výsledné obvodové riešenie bude uvažovať napätie na komore  $U_{pl} = 0-300$  V s možnosťou aplikovať až  $U_{plmax} = 1$  KV v režime zapálenia plazmy,
4. Výstupný signál obdĺžnikového priebehu na frekvencii  $f = 13.56$  MHz pri použití interného oscilátoru (kryštálového oscilátoru), zabezpečenie čo najvyššej možnej napäťovej strmosti signálu na výstupe,
5. Možnosť pripojiť externý VF generátor,



6. Možnosť monitorovať výkon dodávaný do elektrickej záťaže  $Z$  charakteristickej pre plazmovú komoru,
7. Ideálne striedavý signál na výstupe z generátoru.

Všetky tieto požiadavky majú svoje opodstatnenie, ktoré budú ďalej v texte spomenuté. Požiadavka na maximálnu miniaturizáciu vyplýva z potreby použiť dostatočne elektricky krátke vedenie [50] pre minimalizáciu odrazenej EMG vlny prenosu elektrického výkonu  $P(t)$  do plazmovej komory. Čím bude jednotka výkonového generátoru menšia, tým jednoduchšie bude ju umiestniť do tesnej blízkosti plazmovej komory. Minimalizuje sa tým tiež hmotnosť a cena celkového riešenia výkonového generátoru. Výber vhodného výkonového MOSFET tranzistoru a budiča jeho gate elektródy je zapríčinený faktom, že tranzistory, ktoré boli použité v predom diskutovanom komerčnom riešení [34] sa už nevyrábajú. Tu prichádza možnosť zvoliť riešenie, kde sú výkonový stupeň a jeho budič vo vyhotovení ako samostatné súčiastky, alebo použiť integrovaný obvod obsahujúci ako budič tak výkonový MOSFET. Tým by sa zmenšila aj výsledná veľkosť DPS modulu generátoru. Požiadavky na budiace napätie komory a tvar výstupného signálu boli zadane vedúcim práce a vyplývajú z parametrov a funkcie plazmovej komory, pre ktorú bude generátor určený. Možnosť pripojiť externý VF generátor a nahradiť tým interný zdroj signálu  $f = 13.56$  MHz je cieľným zvýšením univerzálnosti výkonového generátoru. Bude tak možné nastaviť frekvenciu výstupného signálu aj na iné hodnoty, poprípade nastavovať iné parametre signálu (strieda, napäťová strmosť budiaceho signálu...). Ako bolo popísané v predchádzajúcom texte, ďalšou veľmi často používanou frekvenciou pre budenie plazmových komôr je frekvencia  $f = 27.12$  MHz [7]. Požiadavka na monitorovanie výkonu dodávaného do elektrickej záťaže  $Z$  (plazmovej komory) súvisí s následným návrhom meracej sondy pre vyhodnotenie zložiek elektromagnetického poľa buďeného v plazmovej komore. Výstupom generátoru by mal byť signál striedavý (kladný aj záporný elektrický potenciál), napriek tomu, že principiálne plazmovej komore jednosmerná zložka nevadí. Požiadavka vychádza z cieľovej funkcie plazmovej trysky a fyzikálnych dejov vnútri predloženej plazmovej komory. Taktiež z pohľadu bezpečnosti pri práci s komorou je jednosmerná zložka nežiaduca. Preto by bolo vhodné, aby bol výstupný signál z generátoru striedavý, bez jednosmernej zložky.

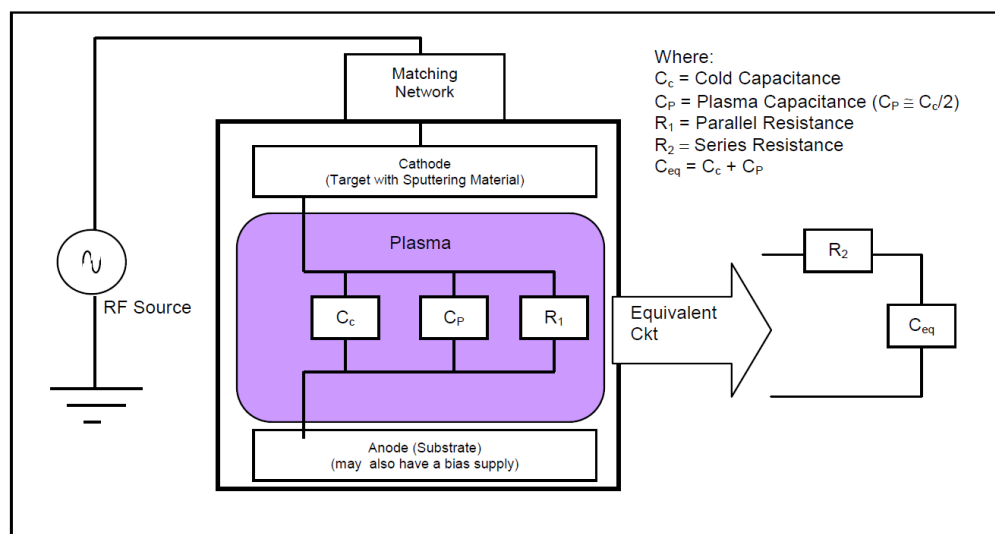
## 6. PARAMETRICKÉ PRISPÔSOBENIE KOMORA/GENERÁTOR

Pri realizácii VF generátorov pre plazmové komory je nutné riešiť minimalizáciu odrazenej EMG vlny späť do generátoru pri prenose elektrického výkonu  $P(t)$  z generátoru do plazmovej komory [13]. K danej problematike možno pristupovať dvoma spôsobmi

1. Návrh prispôsobenia pre generátory harmonických signálov [13], [27],
2. Návrh prispôsobenia pre generátory neharmonických (obdĺžnikových) signálov [28].

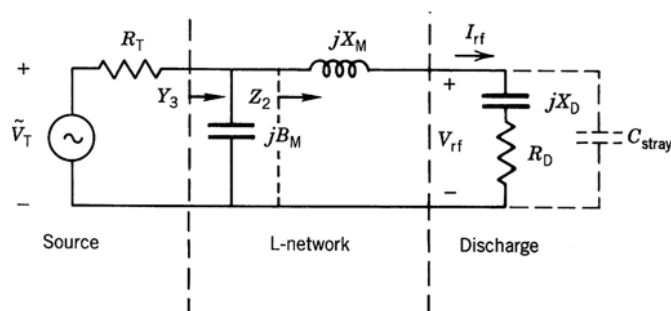
**Ad 1.** V prípade prispôsobenia pre generátory harmonických signálov je situácia jednoduchšia [27]. Prenos elektrického výkonu  $P(t)$  medzi generátorom a plazmovou komorou je realizovaný koaxiálnym elektrickým vedením. Pri práci s VF technikou je dôležité, aby bol výstup generátoru impedančne prispôsobený vstupu elektrickej záťaže  $Z$  (rezonátoru) [13]. Vstupná impedancia  $Z$  rezonátoru však nie je konštantná v závislosti na frekvencii signálu  $f$  [18]. V stave, keď je v komore horiaca plazma, je impedancia iná ako v stave, keď v komore plazma nie je (pred zapálením) [7], [18].

Ak by výkonový generátor a plazmová komora neboli impedančne prispôsobené, vznikol by späť do generátoru odrazený výkon  $P_{refl}$ , ktorý by mohol daný generátor pri nedostatočnom dimenzovaní súčiastok poškodiť [13]. Za týmto účelom je potrebné vytvoriť obvod, ktorý by udržoval generátor impedančne prispôsobený plazmovej komore. Väčšinou sa jedná o RLC alebo LC obvody s vhodne zvolenými parametrami súčiastok [13]. Pre návrh takýchto obvodov je potrebné odvodiť náhradnú schému danej plazmovej komory [13].



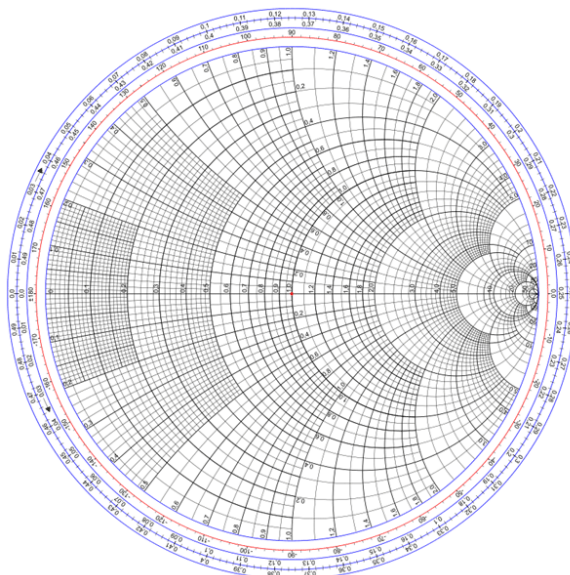
Obrázok 6.1 Náhradná schéma plazmovej komory, prevzaté z [13].

Na impedančnom prispôsobení pri RF signáloch hrá dôležitú úlohu aj dĺžka samotného prepojovacieho vedenia. Túto problematiku rieši autor v práci [13], kde dĺžku elektrického vedenia pre generátor harmonického priebehu pracujúceho na frekvencii  $f = 13.56$  MHz stanovil na násobky  $l_{el} = 5.15$  m. Toto je teoreticky štvrtina vlnovej dĺžky signálu základnej frekvencie budenia. Pri nesplnení prispôsobenia dĺžky koaxiálneho vedenia môže vzniknúť viacero problémov, napríklad vznik odrazených vĺ a následné zahrievanie vedenia spôsobené týmito vlnami, napäťové zaťaženie výkonových prvkov generátoru, atď. [13]. Ďalej autor práce [13] popisuje postup pri návrhu obvodu pre impedančné prispôsobenie podľa Smithového diagramu (Smith chart) zo znalostí parametrov plazmovej komory.



Obrázok 6.2 Príklad schematickeho zapojenia zobrazuje zjednodušene zdroj (source), obvod impedančného prispôsobenia (L-network) a náhradnú schému plazmovej komory (Discharge)- pre CCP plazmu, prevzaté z [9].

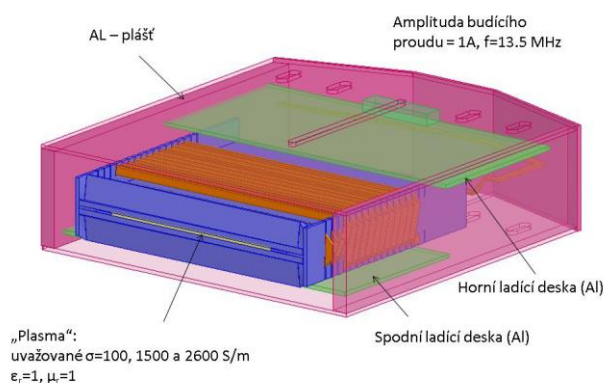
Smithov diagram je grafický nástroj, ktorý sa používa pri výpočtoch impedančných prispôsobení VF vedení. Jeho znázornenie je na obrázku 6.3. Jedná sa o znázornenie závislosti činiteľa odrazu na impedancii v komplexnej rovine [25].



Obrázok 6.3 Ukážka Smithového diagramu, prevzaté z [26].

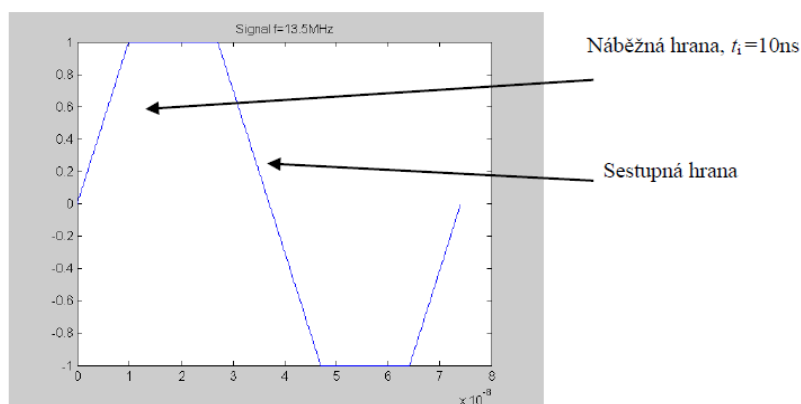
Toto je riešenie pre systémy, ktoré sú budené harmonickým signálom. V prípade prispôsobenia pre navrhovaný a realizovaný VF výkonový generátor, tzv. spínaný generátor, je situácia zložitejšia.

**Ad 2.** Namiesto harmonickým signálom bude plazmová komora budená neharmonickým (obdĺžnikovým) signálom. V tomto prípade je potreba zvoliť inú metodiku pre minimalizáciu stojatej EMG vlny na elektrickom vedení ku komore, pretože elektrická impedancia  $Z$  je definovaná iba pre harmonické priebehy veličín v obvode [47]. Touto problematikou sa zaoberal aj autor v prácach [27-29], kde navrhol riešenie systému budeného ako harmonickým tak obdĺžnikovým signálom. Návrh vychádzal z numerického modelu plazmovej komory spracovaného pomocou programu ANSYS. Použitý geometrický model plazmovej komory bol zhodný pre obe varianty a je uvedený ako obrázok 6.4.

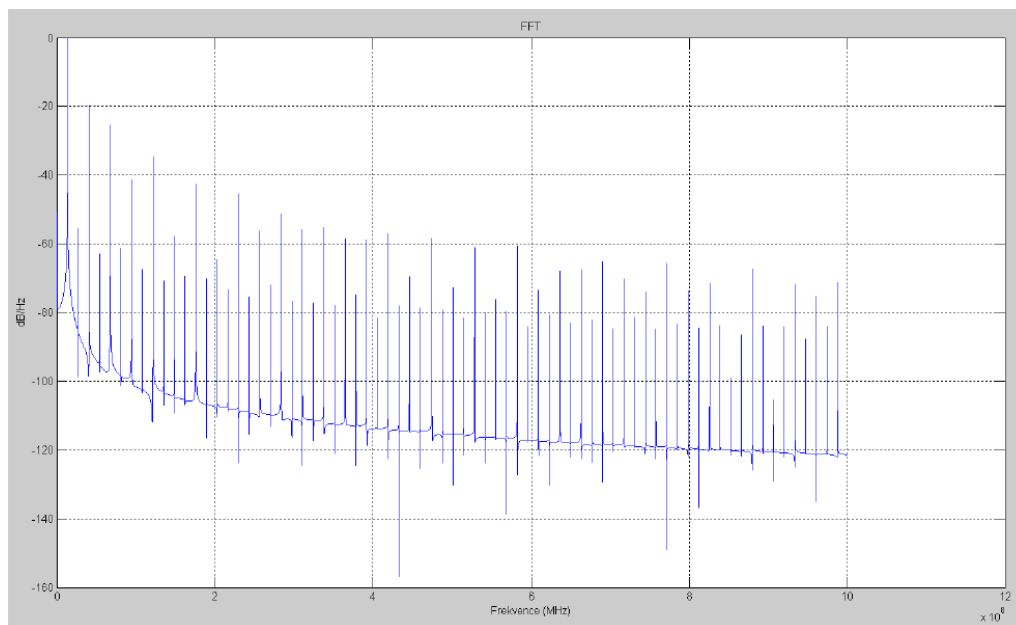


Obrázok 6.4 Geometrický model plazmovej komory, prevzaté z [27].

Pri použití spínaného generátoru môžeme na vstupe plazmovej komory očakávať priebeh signálu znázornený na obrázku 6.5. Pre takto definovaný signál je možno zobrazit' rozklad do amplitúdovo-frekvenčného spektra pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT- Fast Fourier Transform). Dané spektrum je znázornené na obrázku 6.6.



Obrázok 6.5 Signál na vstupe plazmovej komory, prevzaté z [28].



Obrázok 6.6 Amplitúdovo-frekvenčné spektrum obdĺžnikového signálu z obrázku 6.5, prevzaté z [28].

Ako možno vidieť z amplitúdového spektra (obrázok 6.6), v systéme sa budú do značnej miery prejavovať vyššie harmonické (jedná sa o násobky prvej harmonickej  $f_1 = 13.56$  MHz, tj.  $f_2 = 27.12$  MHz,  $f_3 = 40.68$  MHz, ...) [28]. Pri budení neharmonickým signálom teda nemožno hovoriť o impedančnom prispôbení, ktoré je známe pre prípady harmonických signálov. Minimalizácia stojatej vlny iba pre signál  $f_1 = 13.5$  MHz (prvú harmonicú) by bolo nedostatočné, treba taktiež riešiť minimalizáciu pre vyššie harmonické [28]. Treba uviesť, že v reálnom systéme sa vždy určitý odrazený výkon  $P_{refl}$  smerom k budiacej elektronike prejaví. Mieru odrazeného výkonu  $P_{refl}$  dokážeme vyčíslieť a na základe tohto údaju navrhnuť čo najvhodnejší prispôbovací obvod. Tj. obvod pri ktorom je odrazený výkon späť do generátoru čo najmenší a výkon  $P_z$  dodaný do elektrickej záťaže  $Z$  čo najväčší. Z práce [28] možno prevziať ďalšie závery, ktoré môžu návrh minimalizácie stojatej EMG vlny uľahčiť:

1. Znížením strmosti neharmonického signálu docielime značné zníženie podielu zložiek vyšších harmonických [28],
2. V stave horiacej plazmy poklesnú zložky vyšších harmonických (minimálne o 30% pre dané usporiadanie komory) [28],
3. V stave bez plazmy majú vyššie harmonické minimálny pokles oproti prvej harmonickej [28].

## 6.1 Aplikovateľné riešenia minimalizácie stojatej EMG vlny

Realizovaný výkonový generátor bude s plazmovou komorou prepojený pomocou symetrického elektrického vedenia (koaxiálne elektrické vedenie).

Ponúkajú sa dve možné riešenia minimalizácie odrazenej vlny.

**Prvým** riešením je obvodový návrh prispôsobenia pomocou zistených  $Z$  parametrov plazmovej komory. V tomto prípade je postup nasledovný

1. Stanovenie  $S$  a  $Z$  parametrov plazmovej komory,
2. Návrh prispôsobenia pre prvú harmonickú ( $f = 13.56$  MHz) z daných  $S$  a  $Z$  parametrov,
3. Naznačenie očakávaného priebehu budiaceho signálu generátoru a následne pomocou FFT určenie amplitúdovo-frekvenčného spektra (naznačené na obrázkoch 6.5 a 6.6),
4. Pre vyššie harmonické opakovať metodiku bodu č.2- návrh prispôsobenia pre dané frekvencie ( $f_2 = 27.12$  MHz,  $f_3 = 40.68$  MHz....) z daných  $S$  a  $Z$  parametrov. Následné doplnenie zmeny parametrov pre prvú harmonickú.

Toto riešenie vyzerá síce jednoducho, pre dosiahnutie ideálneho výsledku je ale značne časovo náročné.

**Druhým** riešením ako minimalizovať odrazenú vlnu je voliť takú dĺžku elektrického vedenia, aby sa odrazená vlna minimalizovala (nemohla prejavíť). Takáto situácia nastáva v prípade, keď je dĺžka elektrického vedenia zvolená tak, že čas za ktorý prejde daný signál z výkonového generátoru do elektrickej záťaže  $Z$  a späť je kratší, ako doba nástupnej alebo zostupnej hrany budiacej EMG vlny [50]. Autor práce [50] uvádza hraničné dĺžky elektrických vedení pre budiace EMG vlny s typickými hodnotami nástupných hrán pri rýchlosti šírenia EMG vlny  $v = 0.22$  m/ns. Maximálna prípustná dĺžka elektrického vedenia pre budiaci signál s dĺžkou nástupnej/zostupnej hrany 3 ns (zodpovedá požiadavkám na generátor diskutovaných v kapitole 5) bola stanovená autorom práce [50] ako  $l_{max} = 33$  cm.

Ak je splnená podmienka pre elektricky krátke vedenie, impedančné prispôsobenie nie je potrebné [50]. V tomto prípade je čas kmitu EMG vlny omnoho dlhší ako čas šírenia vlny po vedení, z toho vyplýva, že elektrický prúd  $i(t)$  s amplitúdou  $I$  bude vo všetkých miestach vedenia takmer rovnaký [33].

Pri realizácii bude vhodné voliť elektrické vedenie o dĺžke približne  $l = 10$  cm, obvodový návrh prispôsobenia teda nebude nutný.

Z dvoch uvedených možností minimalizácie odrazenej EMG vlny si pre realizáciu generátoru vyberám druhé riešenie, teda minimalizáciu pomocou dostatočne elektricky krátkeho elektrického vedenia. Nakoľko je možnosť umiestniť jednotku generátoru hneď do blízkosti plazmovej komory, javí sa toto riešenie vhodnejšie z pohľadu funkčnosti, ceny aj rozmerov daného výkonového generátoru.

## 7. NÁVRH KONCEPCIE GENERÁTORU

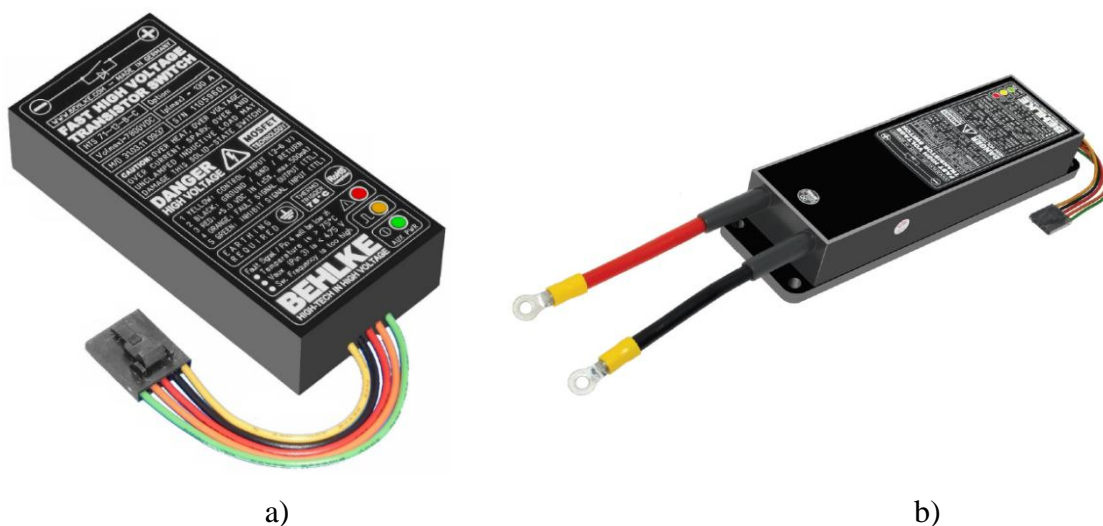
Pri návrhu koncepcie VF výkonového generátoru pre frekvenciu  $f = 13.56$  MHz som sa zameral na dve možné riešenia

1. Návrh jednoduchého modulu generátoru pomocou spínacích jednotiek Behlke,
2. Návrh obvodového riešenia, vychádzajúceho z existujúcich, doporučených konfigurácií.

Obe tieto riešenia budú diskutované ďalej v texte.

### 7.1 Systém tvorený spínacími jednotkami Behlke

Základom takéhoto generátoru sú spínacie jednotky firmy Behlke radu HTS (high voltage transistor switches) [48]. Jedná sa o polovodičové spínače pre vysokonapäťové aplikácie. Takúto jednotku tvorí sériovo – paralelné zapojenie veľkého množstva MOSFET tranzistorov [48]. Takáto jednotka je znázornená na obrázku 7.1.



Obrázok 7.1 a) Spínacia jednotka BEHLKE HTS 121-01-C, compact prevedenie, prevzaté z [30],  
b) Spínacia jednotka BEHLKE HTS 121-03-C, compact prevedenie, prevzaté z [31].

Veľká výhoda pri použití týchto jednotiek tkvie v možnosti použiť vodné chladenie na efektívny odvod tepla. Jednotka má maximálnu pracovnú teplotu určenú ako  $T_{max} = 70^{\circ}\text{C}$  [48]. Toto koncepčné riešenie výkonového generátoru má výhodu v jednoduchosti a malých rozmeroch. Jedná sa o systém pozostávajúceho z jednosmerného zdroja, dvoch spínacích jednotiek Behlke zapojených v push-pull konfigurácii, ktoré priamo napájajú plazmovú komoru. Behlke jednotky sú riadené mikrokontrolérom [30]. Odrazená EMG vlna na elektrickom vedení prenosu výkonu do

plazmovej komory by bola minimalizovaná pomocou dostatočne elektricky krátkeho vedenia [50], čo by bolo ľahko dosiahnuteľné vďaka malým rozmerom jednotiek Behlke. Tie by bolo možné umiestniť priamo k plazmovej komore. Zdroj napájajúci spínače by potom mohol byť realizovaný samostatne, spínače by napájal iba pomocou predlžovacieho vedenia. Tým by sa zamedzilo zbytočne veľkým rozmerom a hmotnosti samostatnej komory.

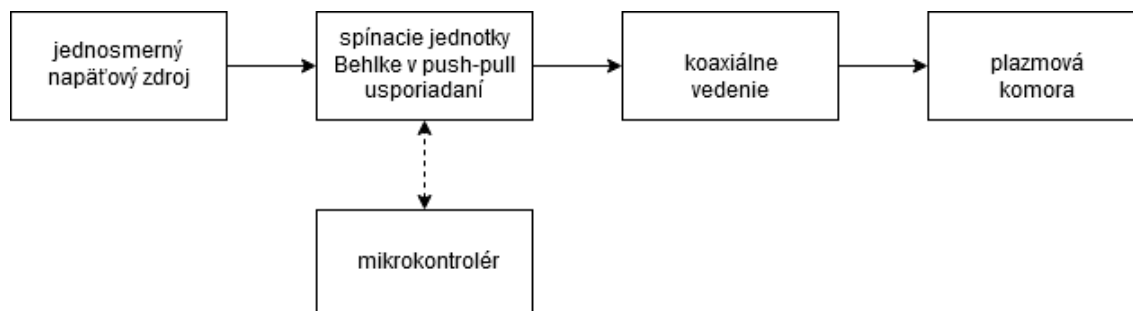
V tabuľke 7.1 uvádzam parametre vybraných jednotiek Behlke, o ktorých aplikácii možno uvažovať. Konceptia daného riešenia je zobrazená na obrázku 7.2 v podobe zjednodušeného blokového diagramu.

Tabuľka 7.1 Parametre vybraných jednotiek Behlke [30], [31], [32]

	HTS 121-01-C	HTS 121-03-C	HTS 151-01	HTS31-06-C
<b>Turn-on rise time</b> $t_{r(on)}$ [ns]	12	14	13	<10
<b>Turn-off rise time</b> $t_{r(off)}$ [ns]	<10	<12	<10	<10
<b>Maximum turn-on time</b> $t_{on(max)}$ [ns]	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b>Minimum turn-on time</b> $t_{on(min)}$ [ns]	50	75	50	50
<b>Maximum operating voltage</b> $V_o$ [kV]	12	12	15	3
<b>Maximum turn-on peak current</b> $I_p(max)$ [A]	15	32	12	64
<b>Typical turn-on resistance</b> $R_{stat}$ [ $\Omega$ ]	38	21	60	2
<b>Maximum continuous load current</b> $I_L$ [A]	1.19	2	1.15	3.92
<b>Maximum continuous power dissipation</b> $P_{d(max)}$ [W]	100	200	150	100



Pozn. parametre boli určované pre typ chladenia: vodné, prietok 0.1 l/min. získané hodnoty sú z produktových listov (datasheetov) [30], [31], [32].



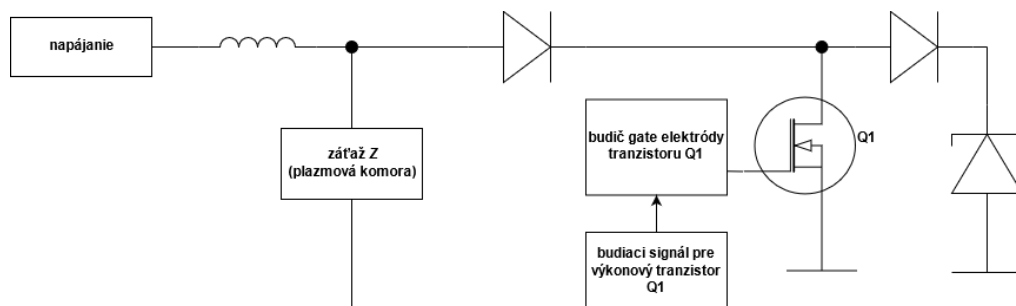
Obrázok 7.2 Zjednodušený blokový diagram generátoru tvoreného spínacími jednotkami Behlke.

Veľká nevýhoda týchto spínačov je práve v zložitom vnútornom zapojení. Sériovo – paralelné usporiadanie MOSFET tranzistorov sa prejavuje pomerne veľkým odporom, to možno vidieť v tabuľke 7.1 pri modeloch HTS 121-01-C, HTS 121-03-C a HTS 151-01, parameter Typical turn-on resistance (odpor pri zopnutí). Tento odpor  $R_{stat}$  potom spôsobuje väčší stratový výkon  $P_{strat}$  na spínači a tým jeho zbytočné zahrievanie. Jednotka HTS 31-06-C má tento odpor najnižší, iba okolo  $R_{stat} = 2 \Omega$ . Firma Behlke má vo svojom portfóliu zahrnuté aj priamo moduly, ktoré už obsahujú push-pull konfiguráciu dvoch jednotiek. Aj napriek tomu, že riadiť takýto modul by bolo jednoduchšie ako riadiť dva moduly samostatne, uvádzaný odpor pri zopnutí takýchto modulov bol väčší ako u samostatných jednotiek (okolo  $R_{stat} = 15 \Omega$ ) pri menšej napäťovej strmosti. Preto sa ďalej týmto konceptom nebudeme zaoberať.

Použitie danej koncepcie bolo nakoniec úplne eliminované požiadavkou zadanou na budenie plazmovej komory. Budiace napätie  $U_{pow}$  malo byť rádovo v stovkách voltov. To by pri potrebe splniť dané parametre, dodaný výkon do záťaže  $P_z = 1000 \text{ W}$ , znamenalo dodávať do obvodu elektrický prúd  $I > 10 \text{ A}$ . Ako možno vidieť v tabuľke 7.1, takúto požiadavku nie je schopná splniť ani jedna z Behlke jednotiek. Ďalšou nevýhodou takejto koncepcie by bola závislosť na riadiacom mikrokontroléri.

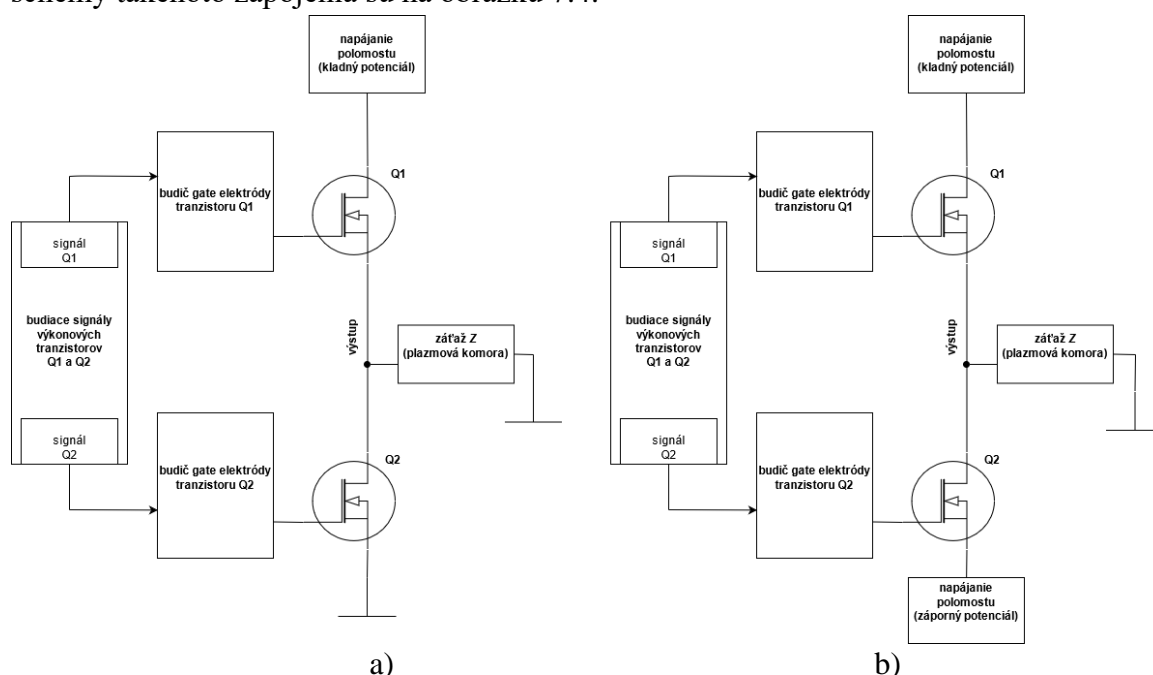
## 7.2 Obvodové riešenia generátoru

Pri návrhu obvodového riešenia generátoru sa ponúka viacero možností. Ako jedno z riešení by bolo upraviť už spomínanú jednotku PRF-1150 [34] z produkcie firmy IXYS [64], ktorej princíp spočíva v spínaní jediného tranzistoru voči referenčnému uzlu (zemi). Taktiež možno použiť ďalších principiálnych zapojení tranzistorov, napríklad zapojenie „FLYBACK“, uvedené na obrázku 7.3. Pri tomto zapojení je do plazmovej komory dodávaná energia naakumulovaná v pracovnej tlmivke.



Obrázok 7.3 Principiálna schéma zapojenia „FLYBACK“.

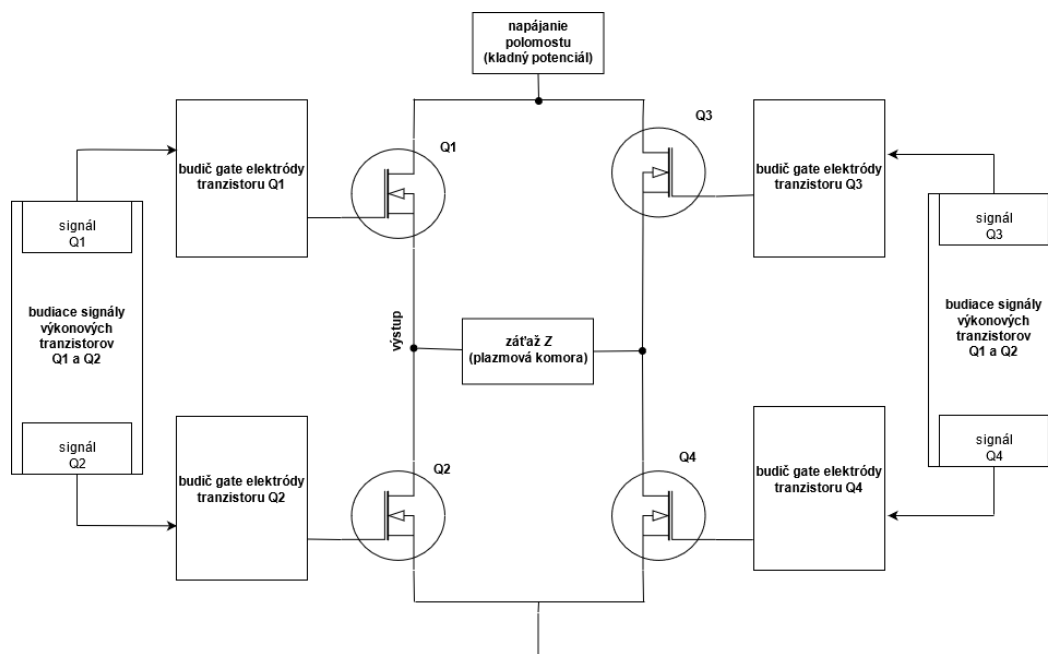
Ďalšou diskutovanou koncepciou je pol-mostové zapojenie tranzistorov, principiálne schémy takéhoto zapojenia sú na obrázku 7.4.



Obrázok 7.4 Principiálne schémy pol-mostových zapojení, pol-most s nesymetrickým napájaním (a) a so symetrickým napájaním (b).

Princíp fungovania pol-mostového zapojenia je založený na zopnutí jedného tranzistoru (Q1), pričom druhý tranzistor je v rozopnutom stave (Q2). Na elektrickú záťaž Z je potom takto striedavo pripájaný rozdielny potenciál (v závislosti na napájaní pol-mostu- symetrické alebo nesymetrické).

Poslednou diskutovanou koncepciou je mostové zapojenie tranzistorov. Takouto koncepciou sa bližšie zaoberal aj autor textu [45]. Principiálne zapojenie takéhoto riešenia je na obrázku 7.5.



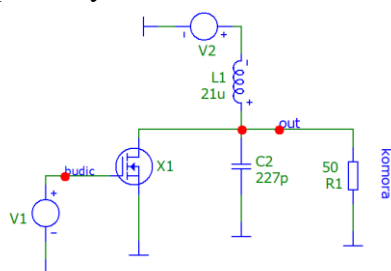
Obrázok 7.5 Principiálna schéma mostového zapojenia.

V anglickej literatúre sa takéto zapojenie označuje „H-bridge“ [45]. Toto označenie vyplýva z tvaru zapojenia. Princíp fungovania je založený na zopnutí vždy dvoch náprotivých tranzistorov (Q1,Q4), pričom ostatné dva tranzistory (Q2,Q3) sú v rozopnutom stave [45]. Tzn. Tranzistor Q1 a Q4 sú zopnuté a vedú elektrický prúd  $i(t)$  ktorý preteká záťažou Z, tranzistory Q2 a Q3 sú v tejto chvíli rozopnuté. V opačnom prípade sú zopnuté tranzistory Q2 a Q3, pričom tranzistory Q1 a Q4 sú v rozopnutom stave [45].

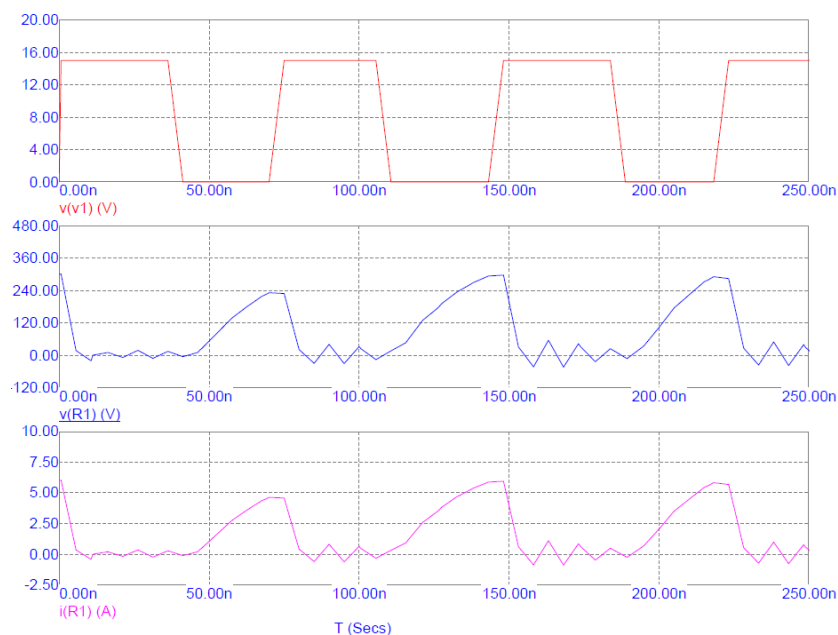
Pri všetkých diskutovaných riešeniach bude k simulácii použitý tranzistor DE-475-102N21A-00 [62], určený pre VF aplikácie z produkcie firmy IXYS.

### 7.2.1 Úprava Jednotky PRF-1150

Oproti požadovanému riešeniu výkonového generátoru (neharmonický priebeh výstupného signálu) generuje originálny modul IXYS PRF-1150 [34] výstupný signál sínusového priebehu. Riešením by mohlo byť odstránenie rezonančného obvodu a impedančného prispôsobenia. Zjednodušená schéma takto upraveného obvodu je na obrázku 7.6, výstupné priebehy sú zobrazené na obrázku 7.7.



Obrázok 7.6 Zjednodušená schéma upravenej jednotky PRF-1150.

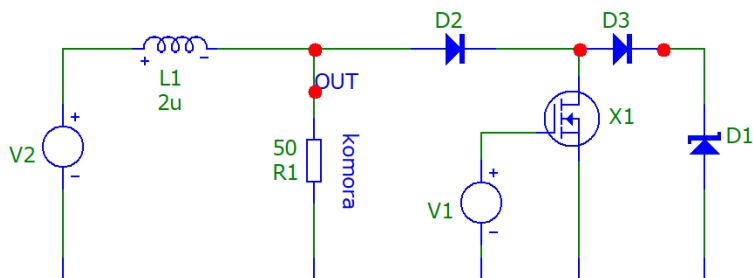


Obrázok 7.7 Priebeh na výstupe upravenej jednotky PRF1150.

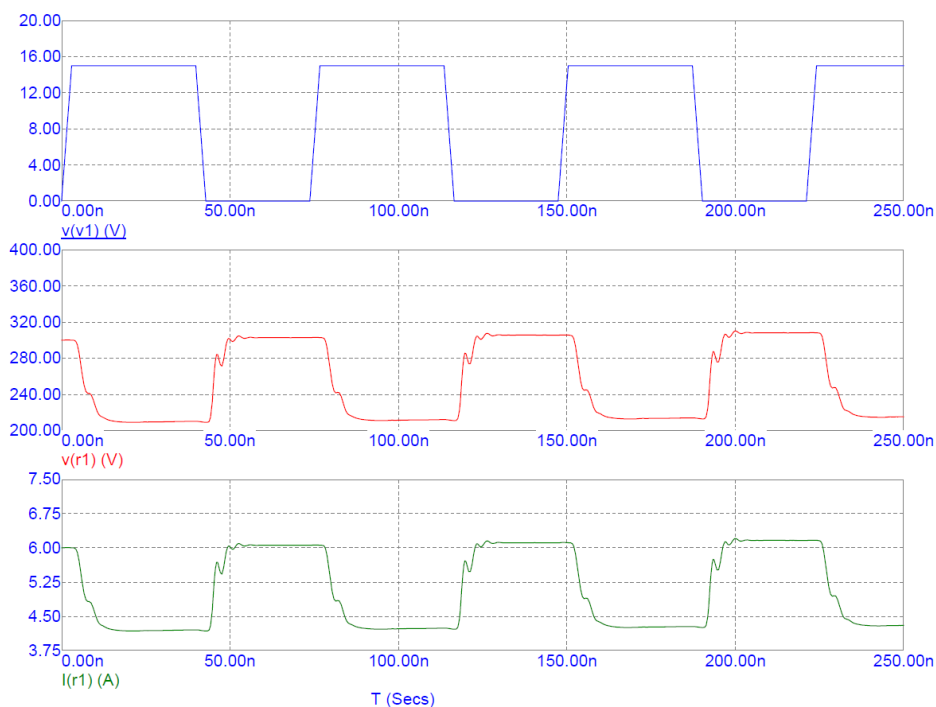
Po získaní informácií o výstupe takto upravenej jednotky PRF1150 možno pojednať o výhodách a nevýhodách daného zapojenia: Za výhodu zapojenia možno považovať, že sa jedná o overené, komerčne dostupné riešenie. Nevýhodou je, že po odstránení rezonančného obvodu, ktorý pôvodne vytváral z výstupného signálu sínusový, má výstupný signál nízku napäťovú strmosť nástupnej hrany, (obrázok 7.7). Ďalšou nevýhodou je jednosmerná zložka napätia na výstupe generátoru (vstupe plazmovej komory).

### 7.2.2 Zapojenie tranzistoru „FLYBACK“

Pri predchádzajúcom zapojení s upravenou jednotkou PRF115, uvedenej na obrázku 7.6, bola najväčším problémom malá napäťová strmosť, ktorú možno vidieť na obrázku 7.7. To by mohlo byť odstránené obvodovým zapojením pracujúcim na princípe „FLYBACK“.



Obrázok 7.8 Zjednodušená schéma zapojenia „FLYBACK“.



Obrázok 7.9 Priebiehy na výstupe Flyback zapojenia.

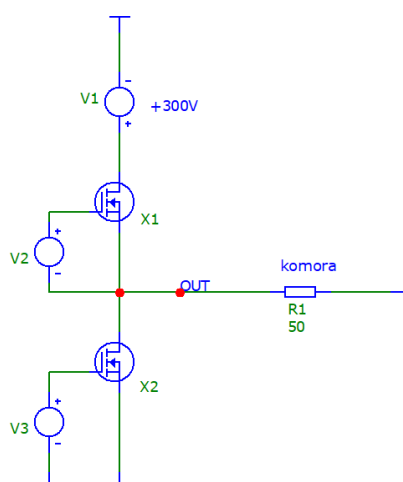
Po porovnaní s požiadavkami na výkonový generátor vo vzťahu k plazmovej komore sa zapojenie „FLYBACK“ javí ako nevhodné z dôvodu vnútornej fyzikálnej činnosti samotnej komory.

### 7.2.3 Pol-mostové zapojenie

Ďalšou alternatívou budenia plazmovej komory je použiť výkonový generátor v ktorom sú výkonové prvky usporiadané do tzv. pol-mosta. Pre našu aplikáciu však nemožno použiť bežné zapojenie s jedným tranzistorom typu N-MOSFET (MOSFET s N kanálom) a druhým tranzistorom typu P-MOSFET (MOSFET s P kanálom). Je to dané tým, že tranzistory typu P-MOSFET sú pomalé, a nemožno s nimi dosiahnuť požadovanú napäťovú strmosť. Preto treba využiť zapojenia s oboma tranzistormi s N kanálom. Tu je možné uvažovať dve principiálne koncepcie

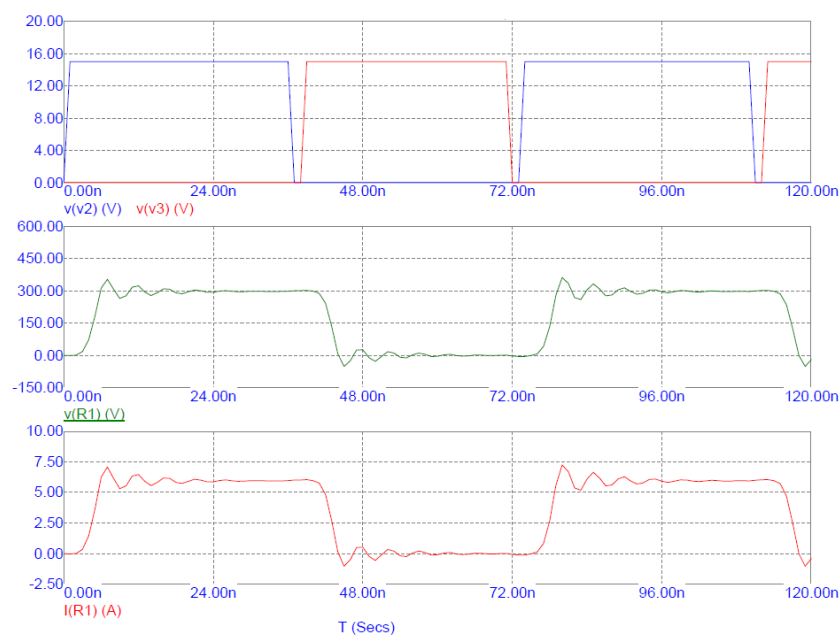
1. Nesymetrické napájanie pol-mostu,
2. Symetrické napájanie pol-mostu.

Jednoduchšou variantou pol-mostového zapojenia je použitie nesymetrického napájania, zjednodušená schéma takéhoto zapojenia je na obrázku 7.10.



Obrázok 7.10 Zjednodušená schéma pol-mostového zapojenia s nesymetrickým napájaním generátoru.

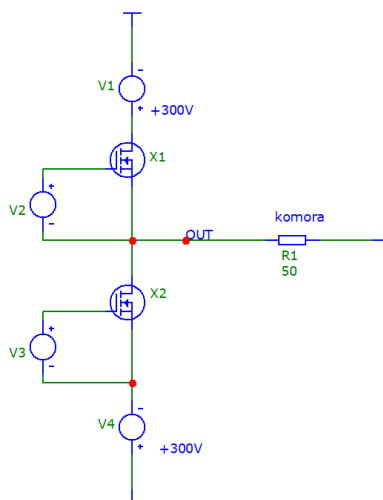
Takáto koncepcia vedie na výsledné priebehy na výstupe, zobrazené na obrázku 7.11.



Obrázok 7.11 Priebehy na výstupe nesymetricky napájaného pol-mosta.

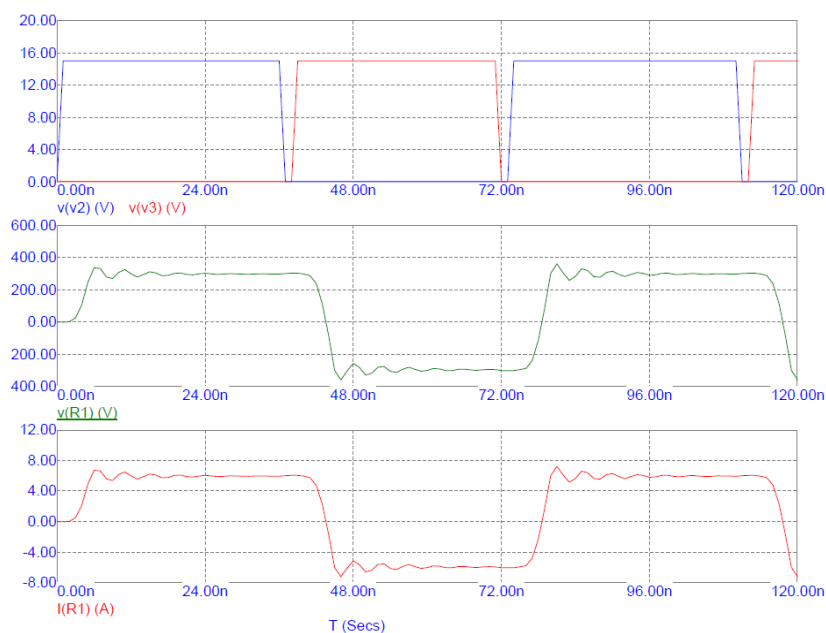
Po získaní analýzy časového priebehu na výstupe možno pojednať o výhodách a nevýhodách daného zapojenia. Najväčšia výhoda uvedeného zapojenia tkvie v použití nesymetrického napájania, teda sú nižšie finančné náklady. Oproti jedno-tranzistorovým zapojeniam je potreba použiť tranzistory dva, avšak odpadá problém s napäťovou strmosťou výstupného signálu. Nevýhodou zapojenia je jednosmerné napätie na výstupe generátoru (vstupe plazmovej komory), ktorému sa je pri zohľadnení požiadaviek na generátor potreba vyhnúť.

Problém s jednosmernou zložkou na výstupe generátoru rieši pol-mostové zapojenie napájané symetrickým napätím. Princiálna schéma takéhoto zapojenia je na obrázku 7.12.



Obrázok 7.12 Zjednodušená schéma pol-mostového zapojenia so symetrickým napájaním generátoru.

Takáto koncepcia vedie na výsledné priebehy na výstupe, zobrazené na obrázku 7.13.



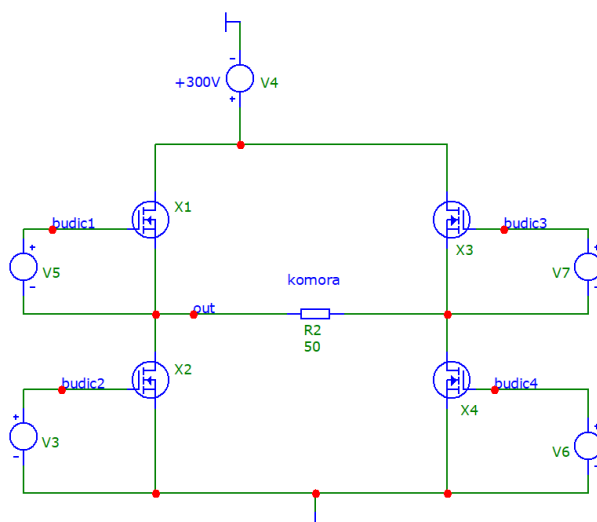
Obrázok 7.13 Priebehy na výstupe symetricky napájaného pol-mosta.

Po rozvahe nad výsledkami analýzy časových priebehov na výstupe generátoru možno pojednať o výhodách a nevýhodách daného zapojenia: Nevýhodou takéhoto zapojenia je potreba symetrického napájania pre daný pol-most. Práve vďaka symetrickému napájaniu však získavame na výstupe generátoru striedavé napätie pri zachovaní požadovanej napäťovej strmosti výstupného signálu.

Obe tieto pol-mostové zapojenia majú ešte jednu nevýhodu, ktorá pri zapojeniach s jedným tranzistorom nenastáva. Jedná sa o potrebu kontrolovať časové sledy budenia tranzistorov Q. Nemôže totiž nastať taký stav, kedy by boli oba tranzistory otvorené – viedlo by to k deštrukcii týchto výkonových prvkov [45]. Treba teda takýto stav ošetriť, napríklad zmenou striedy  $T_1/T_2$  signálu budiaceho tranzistor č.2, ktorý vznikne negáciou druhého signálu určeného pre budenie tranzistoru č.1 [35]. Takéto ošetrenie možno vidieť na obrázkoch 7.11 a 7.13 pri priebehoch signálov V(V2) a V(V3). Pri tomto riešení treba dávať pozor na časové parametre použitých ošetrovacích obvodov a započítať ich k potrebnej zmene striedy.

#### 7.2.4 Mostové zapojenie

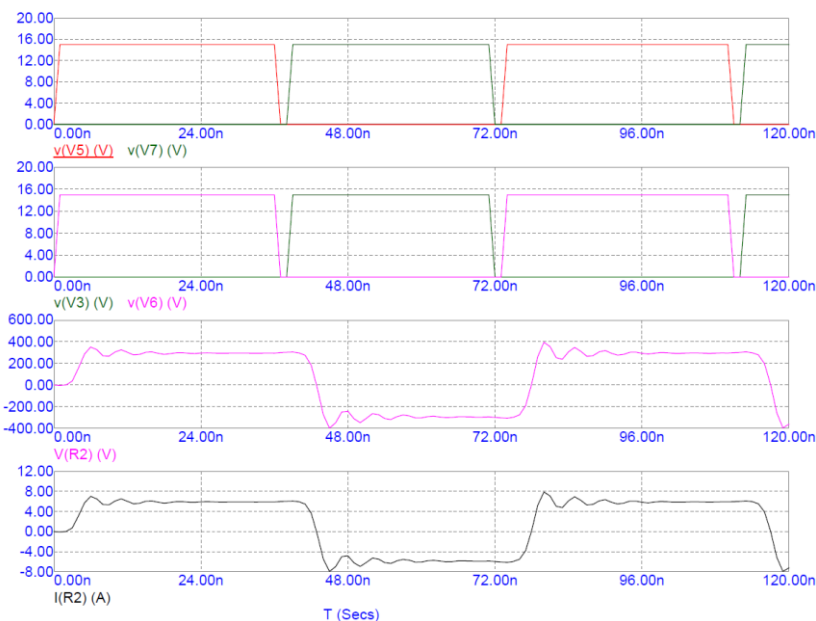
Po diskusii výsledkov simulácií pol-mostových zapojení sa prirodzene naskytuje možnosť použiť celý most. Pri takomto riešení (zobrazenom na obrázku 7.14) by bolo nutné použiť 4 výkonové tranzistory, avšak odpadla by potreba symetrického napájania za účelom zisku striedavého signálu na výstupe z generátoru. Použitie 4 tranzistorov by zase viedlo na použitie 4 budičov pre gate elektródy tranzistorov (gate driver-ov) a vyššie nároky z hľadiska kontroly hazardných stavov a dodržaní návrhových pravidiel. Pre zachovanie malých rozmerov DPS by bolo vhodné použiť integrovaný obvod obsahujúci všetky 4 výkonové tranzistory priamo v mostovom zapojení. Zjednodušená schéma takéhoto zapojenia je na obrázku 7.14.



Obrázok 7.14 Zjednodušená schéma mostového zapojenia.

Takáto koncepcia vedie na výsledné priebehy na výstupe, zobrazené na obrázku 7.15.





Obrázok 7.15 Priebeh na výstupe mostového zapojenia.

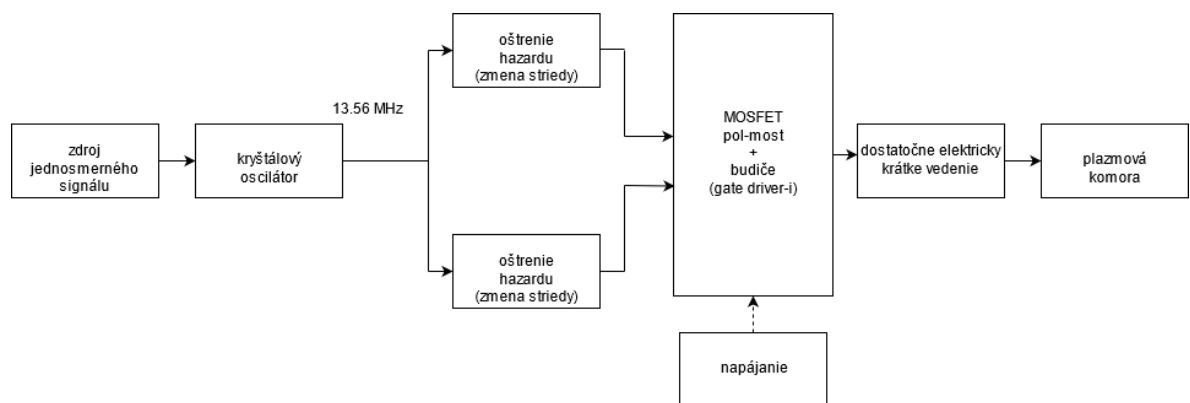
Po získaní informácií o výstupe možno potvrdiť predpokladané tvrdenia uvedené vyššie. Výhodou je zisk striedavého výstupného signálu s požadovanou napäťovou strmosťou bez potreby použiť symetrického zdroja pre napájanie generátoru. Nevýhodou je väčší počet potrebných výkonových tranzistorov a pomerne precízne obvodové riešenie z pohľadu časovania.

### 7.3 Finálny výber vhodnej koncepcie

Po rozборе a simuláciách sprvu uvažovaných riešení možno vybrať tie, ktoré by najlepšie spĺňali požiadavky deklarované vyššie v texte. Riešenie úpravou modulu PRF-1150 nie je možné z hľadiska nepostačujúcej napäťovej strmosti na výstupe. „FLYBACK“ zapojenie nevyhovuje fyzikálnej činnosti predloženej plazmovej komory.

Za vhodné riešenia možno uvažovať pol-mostové a mostové zapojenia.

Po zvážení všetkých parametrov a náležitostí daných zapojení boli ďalej rozpracované návrhy obvodového riešenia používajúceho pol-mostového zapojenia so symetrickým napájaním ako bolo znázornené na obrázku 7.12. Motiváciou bola jednoduchšia koncepcia zapojenia, menšie dosiahnuteľné rozmery a taktiež nižšia cenová náročnosť riešenia. Zjednodušený blokový diagram takejto koncepcie generátora je uvedený na obrázku 7.16.



Obrázok 7.16 Zjednodušený blokový diagram generátoru využívajúceho pol-mostovej koncepcie so symetrickým napájaním.

## 8. VÝBER VHODNÝCH KOMPONENTOV

Výber vhodných komponentov je kritický pre správnu činnosť navrhovaného zariadenia-VF generátoru s výstupným výkonom  $P = 1000 \text{ W}$ . V texte priblížim výber kritických komponentov pre konštruovaný generátor. Ako bolo spomínané v kapitole 5, je požadovaná čo najväčšia napäťová strmosť na výstupe generátoru pre budenie plazmovej komory, preto je vhodné voliť komponenty s čo najrýchlejšími nárastami hrán na požadovanú hodnotu.

### 8.1 Kryštálový oscilátor

Kryštálový oscilátor je zariadenie, ktoré dokáže rozkmitať privedené jednosmerné elektrické napätie na striedavé elektrické napätie s presne definovanou frekvenciou. Výstupná frekvencia  $f_0$  je definovaná kryštálovým rezonátorom vo vnútri kryštálového oscilátoru, ktorý určuje výslednú frekvenciu  $f$ . Takéto zariadenia dodávajú malý výstupný elektrický prúd  $I$  (podľa produktového listu [36]), čo však pri navrhovanej aplikácii nie je problémom, nakoľko výstup oscilátoru bude iba signál pre budič gate elektródy výkonového tranzistoru (gate driver).

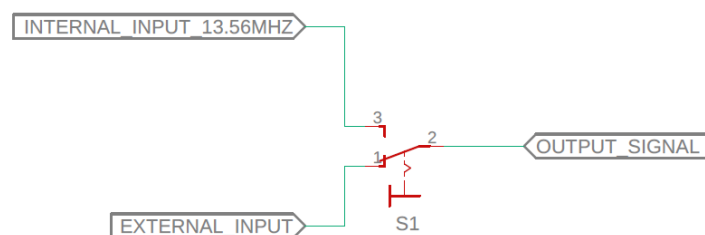
Pre obmedzenú dostupnosť teplotne kompenzovaných kryštálových oscilátorov, ktoré kompenzujú zmeny kmitočtu spôsobené teplotou bola zvolená varianta nekompenzovaného riešenia, pracujúceho priamo na frekvencii  $f_0 = 13.56 \text{ MHz}$ . Jedná sa o model LFSPXO025876 od firmy IQD [36].

### 8.2 Pripojenie externého VF generátoru ako zdroj signálu

Možnosť prepnúť zdroj vysokofrekvenčného signálu je požiadavka vyplývajúca z variability a funkcie plazmovej komory, teda zvyšuje univerzálnosť výkonového generátoru. Okrem možnosti jemnejšie prestavovať triedu signálu alebo úplne zmeniť frekvenciu výstupného signálu taktiež umožňuje použiť generátor aj v prípade poruchy interného kryštálového oscilátoru. Možnosť ako zabezpečiť funkciu prepínania týchto zdrojov signálu je viacero. Medzi najjednoduchšie patrí

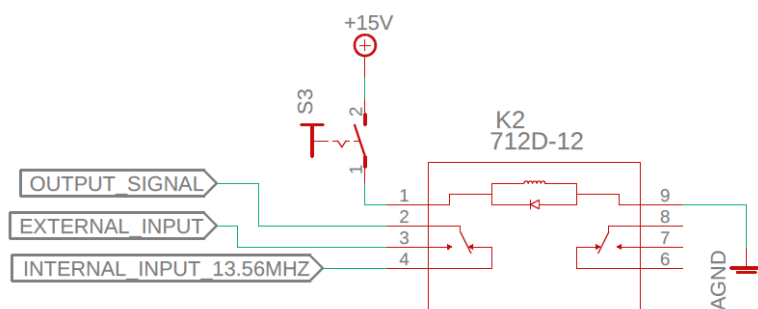
1. Použitie otočného prepínača,
2. Použitie vysokofrekvenčného relé.

Použitie otočného prepínača je najjednoduchším riešením daného problému, kedy sa zdroj signálu prepína jedinou mechanickou súčiastkou. Rovnako je to jediné riešenie, ktoré nevyžaduje zdroj elektrickej energie.



Obrázok 8.1 Znázornenie prepínania zdroju signálu pomocou otočného prepínača.

Ďalšou možnosťou je použitie relé. Táto súčiastka je známa svojou obmedzenou životnosťou avšak pri danom použití je tento aspekt zanedbateľný. Fakt že budú prepínané vysokofrekvenčné signály vedie na potrebu použiť vysokofrekvenčné relé. Takéto relé umožňujú bežne prepínať signály vo frekvenciách rádovo jednotiek GHz. Nevýhodou je nutnosť použitia napájania pre relé a vyššia cena. Napájanie by mohlo byť zabezpečené rovnakým zdrojom, ktorý napája ostatné súčiastky na DPS, takže by nebolo nutné používať ďalší externý zdroj napätia. Požiadavka na prepnutie zdroja signálu by bola znovu podmienená mechanicky, a to zopnutím/vypnutím vypínača. Vhodným modelom pre danú aplikáciu by bolo napríklad relé firmy Teledyne, model 712D-12 [37].



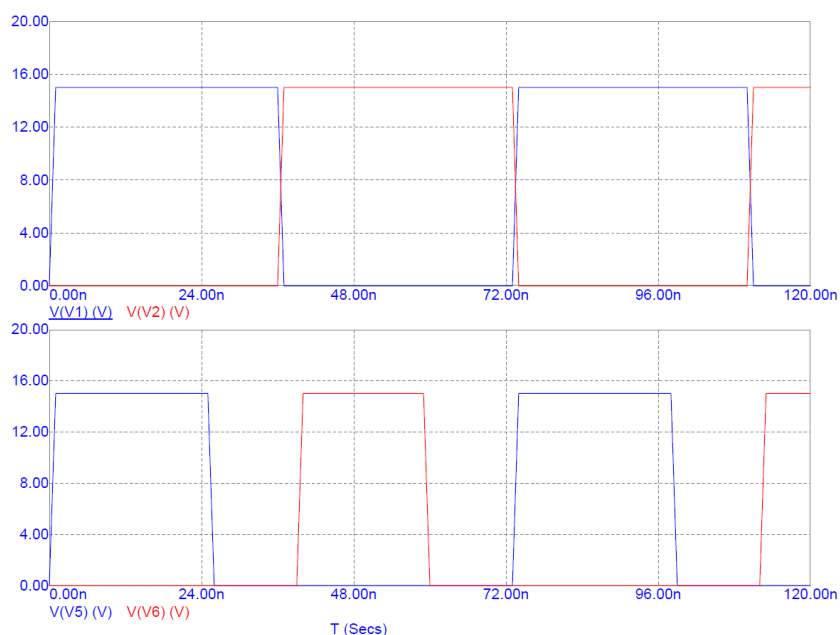
Obrázok 8.2 Znázornenie prepínania zdroju signálu pomocou VF relé.

Pri realizácii volím prepínanie pomocou otočného prepínača, hlavne z dôvodu vysokej ceny vysokofrekvenčného relé, prepínač bude možné na dosku pripojiť cez 3-pinový konektor.

### 8.3 Ošetrenie hazardných stavov tranzistorov

Pri riešení pol-mostovej a mostovej koncepcie treba ošetriť hazardné stavy tranzistorov. Tie vznikajú vo chvíli, keď sú dva tranzistory otvorené súčasne. Takýto stav by viedol k deštrukcii tranzistorov [45]. Z podstaty problému teda vyplýva, že nestačí riadiaci signál druhého tranzistoru negovať, ale treba taktiež nastaviť tzv. mŕtvu dobu (dead-time), časový interval, po dobu ktorého tranzistor „čaká“ na zopnutie. Obrázok 8.3 znázorňuje vstupné signály tranzistorov ako neošetrené tak po ošetrení. Nutno podotknúť, že tento problém treba riešiť iba pri použití tranzistorov s rovnakým typom nosičov

náboja (napríklad tranzistory s N kanálom). Pri použití tranzistorov s oboma typmi, P-MOSFET aj N-MOSFET, stačí priviesť rovnaký budiaci signál na oba tranzistory a hazardné stavy nenastávajú. Ako už bolo diskutované v kapitole 7, tranzistory typu P-MOSFET sú pre uvažované riešenie generátoru pomalé a nie je možné dosiahnuť požadovanej napäťovej strmosti. Táto skutočnosť vedie na potrebu použitia iba tranzistorov typu N-MOSFET a tým pádom aj bližšie riešiť spôsob ošetrenia mŕtvych dôb (dead-time).



Obrázok 8.3 Neošetrené hazardné stavy budenia tranzistorov (horný priebeh) a ich ošetrené ekvivalenty (spodný priebeh).

Naskytujú sa dve možnosti ošetrenia

1. Ošetrenie pomocou diskretných súčiastok,
2. Ošetrenie pomocou integrovaného obvodu, pol-mostový budič (half-bridge driver).

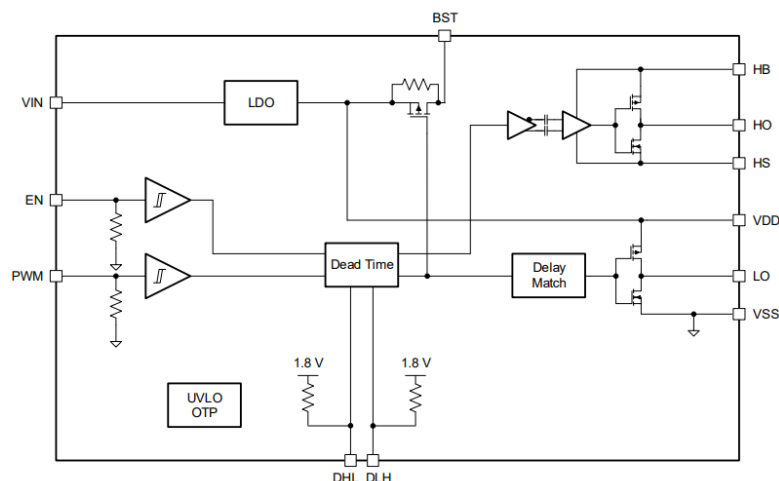
### 8.3.1 Ošetrenie pomocou diskretných súčiastok

Toto riešenie bolo prevzaté z aplikačnej poznámky [35] Firmy Microsemi, kde zabezpečenie správnych časovaní budiacich signálov bolo zabezpečené pomocou viacerých D- klopných obvodov. Princíp spočíval v nastavení rôznej striedy budiaceho signálu pre tranzistorové budiče. Riešenie by mohlo byť realizované rýchlymi D-klopnými obvodmi. Nevýhodou riešenia je veľký počet diskretných súčiastok, ktorý automaticky vedie na zväčšené rozmery DPS. Zároveň toto riešenie nemusí byť ideálne z hľadiska dlhodobej stability.

### 8.3.2 Ošetrovanie pomocou integrovaného obvodu

V prípade, že riešenie s pomocou diskretných súčiastok nie je vyhovujúce, existujú priamo budiče pol-mostových zapojení tranzistorov, ktoré obsahujú ošetrovanie hazardných stavov pomocou nastaviteľných mŕtvych dôb jednotlivých tranzistorov. Takéto riešenia sú zväčša dimenzované pre maximálnu frekvenciu  $f_{max} = 1.5$  MHz, existujú však aj riešenia pre vyššie frekvencie. Napríklad model LMG1210 firmy Texas instruments [38] je dimenzovaný na  $f_{max} = 50$  MHz. Toto riešenie má výhodu v podobe malých rozmerov a jednoduchosti riešenia.

Tento obvod nebude zapojený ako budič výkonových tranzistorov, ale ako generátor signálov pre signálové vstupy budičov výkonových tranzistoru (gate driver-ov). Podľa dostupných informácií z produktového listu (datasheet-u) [38] by toto riešenie bolo možné, nakoľko však výrobca neudáva úplné vnútorné zapojenie, nie je možné správnosť overiť na základe produktového listu a bude potrebné funkčnosť overiť testom. Nevýhodou je možnosť použiť tento obvod iba pre nesymetricky napájané pol-mosty, ak je použitý ako budič výkonových tranzistorov, samotný obvod je totiž možno použiť ako budič gate hradiel tranzistorov schopný dodať elektrický prúd o veľkosti  $I_{max} = 3A$  [38].



Obrázok 8.4 Schéma vnútorného zapojenia LMG1210, prevzaté z [38].

## 8.4 Galvanické oddelenie

Pre zabezpečenie správnej činnosti a zaistenie bezpečnosti musia byť výkonová časť a signálová časť impedančne oddelené. Toto je možné dosiahnuť viacerými spôsobmi

1. Oddelenie pomocou transformátoru,
2. Oddelenie pomocou optočlenu.

### 8.4.1 Galvanické oddelenie pomocou transformátoru

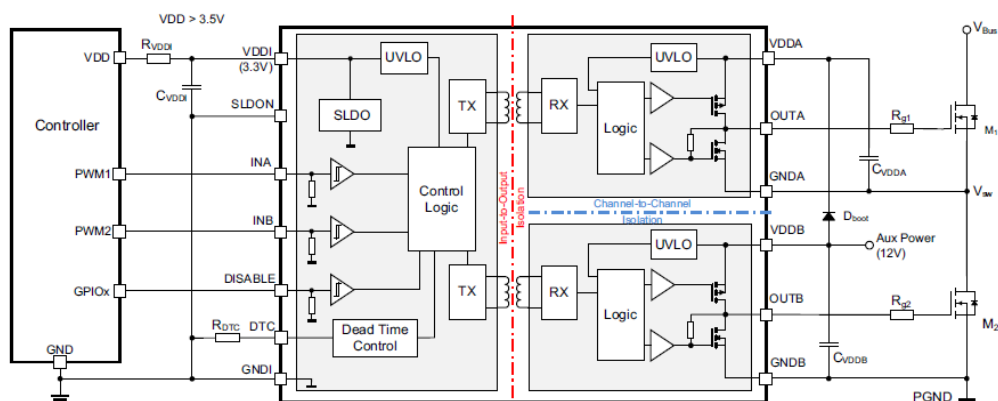
Toto riešenie bolo prevzaté z aplikačnej poznámky [35] Firmy Microsemi, kde na zabezpečenie galvanického oddelenia tranzistorov boli použité impulzné transformátory.

Impulzné transformátory sú zariadenia, ktoré pracujú so signálom s jednosmernou zložkou [39]. Primárne sa používajú pri potrebe galvanicky oddeliť signálovú a výkonovú časť obvodu za prevodu signálu s obdĺžnikovým tvarom [35]. Frekvencia prenášaného signálu je obmedzená vlastnosťami jadra transformátoru [39]. Výhodou takéhoto riešenia galvanického oddelenia je relatívne nízka cena. Nevýhodou je potreba kompenzácie výkonovej straty v jadre transformátoru [39] [35] a potreba navíjania transformátoru ručne, taktiež v potrebe nastavenia jednosmernej zložky a nastavenia pracovného bodu magnetizácie. Nevýhodou tiež môže byť napäťová strmosť signálu, podľa práce [35] bolo potrebné znížiť napäťovú strmosť pre správnu činnosť transformátoru, nakoľko transformátor má problémy pri veľkých hodnotách  $dv/dt$  (potvrďuje aj [39]), čo je typické aj pre uvažovanú koncepciu výkonového generátoru. Je preto nutné hľadať vhodnejšie riešenia.

#### 8.4.2 Pol-mostový gate driver s impedančným oddelením

Firma Infineon ponúka integrovaný obvod [40], ktorý v sebe zahŕňa budič gate hradla pre MOSFET tranzistory schopný dodať elektrický prúd  $I_{max} = 8A$ , impedančné oddelenie výkonovej a signálovej časti a ošetrovanie hazardných stavov tranzistorov. Tento obvod je veľmi zaujímavým riešením, kedy je možné jedinou súčiastkou zabezpečiť väčšinu režie spojenej s riadením pol-mostového zapojenia tranzistorov. Tento obvod je nevhodný pre parametre navrhovaného výkonového generátoru, nakoľko podporuje maximálnu frekvenciu PWM vstupu  $f_{max} = 10 \text{ MHz}$  (podľa produktového listu [40]).

Zjednodušené blokové zobrazenie tejto súčiastky spolu s typickým zapojením sa nachádza na obrázku 8.5 [40].

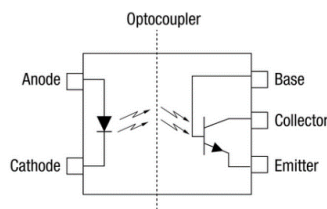


Obrázok 8.5 Schéma vnútorného zapojenia Infineon EICEdriver, prevzaté z [40].

#### 8.4.3 Galvanické oddelenie pomocou optočlenu

Galvanické oddelenie pomocou optočlenu je zabezpečené opto-prvkami. Väčšinou sa jedná o LED diódu na strane vysielacej časti obvodu a foto-tranzistoru na prijímacej časti [41]. Priestor medzi diódou a foto-tranzistorom potom tvorí izolačnú bariéru [41]. Jedná sa o riešenie vyžadujúce napájanie prijímacej časti, avšak veľkou výhodou oproti

impulzným transformátorom je, že nie je potrebné veľkých elektrických prúdov ku kompenzácií strát vo vinutí transformátoru. Pre správnu činnosť treba dodržať maximálneho prúdu  $I_{LED}$  LED diódou. Existujú riešenia, ktoré obsahujú na výstupe priamo budič pre budenie výkonových tranzistorov, avšak to v našom prípade nie je potrebné- takéto riešenia taktiež vyžadujú napájanie výkonnejším zdrojom.



Obrázok 8.6 Principiálna schéma optočlenu, prevzaté z [41].

## 8.5 Výber vhodného výkonového tranzistoru a jeho budiča gate elektródy

Jedným z cieľov zadaných pre navrhované riešenie výkonového generátoru bolo nájsť také obvodové zapojenie, ktoré by pri požadovaných výkonových parametroch viedlo na čo najmenšiu veľkosť súčiastok a minimalizáciu obvodového prevedenia. Tu prichádza možnosť použiť integrovaný obvod obsahujúci výkonový tranzistor aj jeho budič gate hradla. Toto riešenie by automaticky uľahčovalo splnenie návrhovej zásady, že výkonový stupeň a jeho budič musia byť na DPS umiestnené v tesnej blízkosti. Vhodným kandidátom je napríklad DRF1200 [57]. V prípade mostového zapojenia je tiež zaujímavým prvkom integrovaný obvod ARF1510 [60], ktorý obsahuje 4 výkonové MOSFET tranzistory v mostovom zapojení, avšak budiče je nutné riešiť samostatne. Podobne však existujú aj integrované obvody zahrňujúce 4 budiče gate elektród. Informácie o prúdovom zaťažení tranzistoru  $I_d$  dokážem určiť zo simulácií, požadovaný  $I_d \geq 8$  A.

Tabuľka 8.1 Uvažované výkonové MOSFET tranzistory pre realizáciu generátoru [42], [57], [58], [59], [60], [61], [62]

Označenie	$I_d$ [A]	$U_{DSS}$ [V]	Cena [€]	(Dodacia doba)	$P_{dc}$ [W]	Poznámka
DRF1201	26	1000	214,67	2 týždne	1500	Obsahuje budič
DRF1200	13	1000	165,67	20 týždňov	1150	Obsahuje budič
ARF1500	60	500	205,22	Ihneď	1500	
ARF1501	30	1000	214,97	33 týždňov	1500	
ARF1505	25	100	223,57	35 týždňov	1500	
ARF1510	8	1000	226,40	Ihneď	1500	integrovaný H-most
DE375-501N21A	25	500	17,85	42 týždňov	940	
DE475-102N21A-00	24	1000	26,93	nenaskladnené	1800	zastaralé



Pozn.: tabuľka bola vytvorená 13.3.2021, dostupnosť a cena bola stanovená pomocou stránky Mouser.cz a digikey.cz, informácie pochádzajú z produktových listov [42] a [57-62].

Výber tranzistorov, ktoré by mohli byť vhodnými kandidátmi pre použitie vychádza z pomerne úzkej ponuky vysokofrekvenčných výkonových MOSFET tranzistorov. Dlhé dodacie doby sú značným problémom. Zaujímavou voľbou z pohľadu ceny je tranzistor DE-475-102N21A-00 [62], avšak kvôli nedostupnosti vhodného budiča tranzistoru nie je jeho použitie vhodné/možné. Tranzistor má totiž veľmi veľkú kapacitu Gate elektródy. Tento tranzistor taktiež nebol v reálnom čase naskladnený, takže jeho použitie bolo eliminované. Pre realizáciu výkonového generátoru vyzerá vhodne tranzistor DRF1201 [42], ktorý už priamo obsahuje budič gate hradla tranzistoru, čo uľahčí návrh DPS. Taktiež je výhodou veľkosť prierného napätia až  $U_{DSS} = 1000 \text{ V}$  [42]. Maximálny výstupný výkon tranzistoru bol určený výrobcom ako  $P_o = 2 \text{ kW}$ . Pri požadovanom maximálnom výkone generátoru  $P_{max} = 1 \text{ kW}$  a predpokladanej účinnosti  $\eta = 92\%$  (prevzaté z [35], ako uvedená hodnota účinnosti pri výstupnom výkone  $1005 \text{ W}$ ) možno stanoviť príkon a následne výkonovú stratu pomocou vzťahu

$$P_{IN} = \frac{P_{MAX}}{\eta}, \quad (8.1)$$

kde  $P_{IN}$  je elektrický príkon,  $P_{MAX}$  maximálny uvažovaný výstupný výkon generátoru,  $\eta$  účinnosť.

Z tohoto vzťahu možno dopočítať potrebný príkon energie do tranzistoru ako  $P_{IN} = 1087 \text{ W}$ . Z toho vyplýva maximálna výkonová strata na tranzistore  $P_{strat} = 87 \text{ W}$ . Jedná sa o hrubý odhad, pre adekvátne hodnoty treba výsledné riešenie podrobiť meraniu. Z výsledku však vidno, že tranzistor je potrebné chladiť. K tomuto bude využitý blok vodného chladenia, ktorý je potrebný aj k chladeniu plazmovej komory.

## 9. OBVODOVÝ NÁVRH GENERÁTORU

Nasledujúci text uvažuje výber z diskutovaných komponentov v kapitole 8 a ich prepojenie do finálneho návrhu obvodového riešenia generátoru.

Celú schému obvodu možno rozdeliť na 3 základné časti, a to

1. Napájacia časť,
2. Riadiaca časť,
3. Výkonová časť.

Schéma zapojenia sa nachádza v prílohách A-D (pre rozmery rozdelené na viacero výkresov).

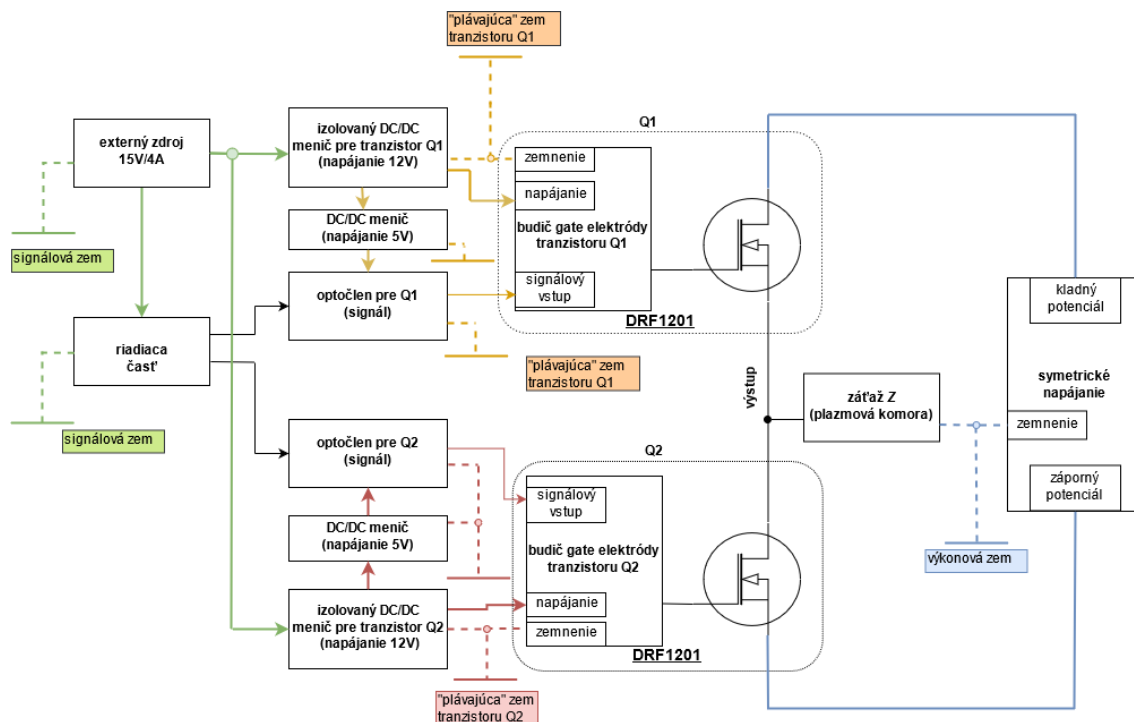
### 9.1 Napájacia časť

Obvodový návrh uvažuje napájanie z externých DC zdrojov energie pripojených cez PCB terminály (obrázok 9.1). Pripojenie zdroju  $U@I_{n1} = 15V/4A$  cez terminál X2 slúži pre napájanie súčiastok v signálovej časti. Pripojenie tohto napájania signalizuje LED dióda (LED1). Pre zabezpečenia napájacieho napätia a signálov  $U_{el} = 5 V$  pre kryštálový oscilátor (OS1) [36], D-klopný obvod (IC8) a LMG1210 (IC6) [38] sú použité lineárne stabilizátory napätia LM7805CT (produkčný list [54]) (IC3, IC5) bez nutnosti chladenia. Ochrana stabilizátorov je realizovaná transilom 8.0SMDJ15A (D1) [66].

Napájanie budičov gate hradieľ výkonových tranzistorov (gate driver-ov) je zabezpečené pomocou izolovaných DC/DC meničov [52] s výstupným napätím  $U_{men} = 12 V$ . Tieto meniče sú taktiež napájané zo zdroju pripojeného cez svorkovnicu X2 cez dvojicu prepojk (samec + samica) (JP2 + J1 a JP14 + J4). Toto umožňuje rozdeliť výsledný návrh obvodového riešenia na dve samostatné DPS. Požadovaný výkon daných DC/DC meničov pri ich výstupnom napätí  $U_{men} = 12 V$  som podľa [49] určil ako  $P = 16.91W$ . Nakoľko z týchto meničov budú napájané ešte optočleny TLP2367\_E (produkčný list [53]) (IC2, IC4), volím DC/DC meniče s adekvátnou výkonovou rezervou  $P = 20 W$ , TRACO POWER THM 20WI (produkčný list [52]). Izolovaný menič PS1 slúži pre napájanie obvodovej časti prislúchajúcej k tranzistoru Q1 a izolovaný menič PS2 pre napájanie časti prislúchajúcej tranzistoru Q2. Referenčné uzly (zeme) týchto dvoch obvodov nemôžu byť spojené. Tranzistory musia byť zapojené na tzv. „plávajúcu“ zem (floating ground) [35]. Optočleny TLP2367\_E (IC2, IC4) nesmú byť napájané priamo z výstupu DC/DC meničov, treba ich napájať cez lineárne stabilizátory napätia LM7805CT (IC1, IC7), tieto stabilizátory nie je potrebné osadzovať chladičom. Dané optočleny slúžia pre oddelenie výkonových referenčných uzlov (zemí) od signálových [41] pre budiaci signál gate hradieľ.

Druhým externým zdrojom je zdroj symetrického napätia pre napájanie pol-mostu. Tento zdroj sa pripája cez terminály X1 (kladný potenciál, zem) a X5 (záporný potenciál, zem). Ďalej popíšem napájací obvod pol-mostu pre vrchný tranzistor, nakoľko situácia

pre spodný tranzistor je rovnaká. Obvod (zobrazený v prílohe B) sa skladá z tlmivky L2, ktorej úlohou je odfiltrovať vyššie frekvencie a skupiny kondenzátorov C3-C6, ktorých úlohou je premostiť všetok striedavý signál do zeme [35]. Kondenzátory C14-C31 slúžia pre dodanie prúdovej špičky do tranzistoru Q1, ktorý inak vykazuje veľké zmeny napájacieho prúdu. Podľa [35] je vhodné, aby mala tlmivka reaktanciu  $X_L = 1 \text{ k}\Omega$ , čomu zodpovedá indukčnosť cievky  $L = 11.737 \text{ }\mu\text{H}$ . Celá situácia riešenia napájania pre uvažované zapojenie je znázornená na obrázku 9.1 (pre zlepšenie čitateľnosti sú signály prislúchajúce jednotlivým častiam znázornené farebne).



Obrázok 9.1 Principiálna schéma napájania obvodov spojených s tranzistormi Q1 a Q2.

Ako vidno na obrázku 9.1, správne zemnenie symetricky napájanej pol-mostovej topológie je kritické pre správnu funkčnosť zariadenia, okrem práce [35] je tento aspekt diskutovaný aj v produktovom liste [38].

## 9.2 Riadiaca časť

Riadiaca časť (zobrazená v prílohách A,C,D) je tvorená prvkami zabezpečujúcich distribúciu a úpravu VF signálu. Základom je kryštálový oscilátor (OS1) pracujúci na frekvencii  $f_0 = 13.56 \text{ MHz}$ , ktorého výstupný signál má striedu  $T_1/T_2 = 50:50$ . Pomocou prepajky JP9 je možné pripojiť vypínač pre zapnutie/vypnutie oscilátoru. V prípade nepripojenia vypínača bude oscilátor pracovať neustále (pri pripojenom napájanom napätí), prepajku JP9 v tomto prípade neskratovať. Úprava striedy signálu je následne

možná pomocou PWM modulátora tvoreného D- klopným obvodom 74ACT74D (IC8A). Pripojiť externý zdroj signálu je možné po pripojení otočného prepínaču na prepojkú JP10. Pre pripojenie externého zdroju signálu slúži SMA konektor (X4). V prípade nevyužitia prepínača je potrebné spojiť piny 1 a 3 pre distribúciu interného signálu. Následne je signál upravený pomocou obvodu LMG1210 (IC6), ktorý umožňuje nastavenie mŕtvej doby pre vrchný výkonový tranzistor pomocou trimru R10. Obdobne možno nastaviť mŕtvu dobu spodného výkonového tranzistoru pomocou trimru R15. Na výstupe obvodu LMG1210 sú signály pre budenie vrchného a spodného výkonového tranzistoru. Nasledujúca časť je rovnaká pre distribúciu signálu do oboch tranzistorov, opíšem teda iba časť budiacu vrchný tranzistor. Výstupný signál z obvodu LMG1210 následne postupuje do optočlenu TLP2367\_E (IC2). Rezistor R5 zabezpečuje bezpečný prúd pre LED cez diódu optočlenu a kondenzátor C8 pomáha zlepšiť napäťovú strmosť  $dv/dt$  na vstupe optočlenu. Za prvkami zabezpečujúcimi vhodné parametre medzi obvodom LMG1210 a optočlenmi sú dvojice prepojok (samec + samica) (JP5 + J2) umožňujúce rozdeliť výsledný návrh obvodového riešenia na dve samostatné DPS. Výstup optočlenu je potom privedený na signálový vstup tranzistoru DRF1201 (Q1). V celej signálovej časti je množstvo prepojok (JP1, JP3, JP4, JP6, JP7, JP11, JP12, JP13), určených pre možnosť merať parametre budiaceho signálu.

### 9.3 Výkonová časť

Výkonová časť navrhovaného generátoru (zobrazená v prílohách C a D) je tvorená dvomi tranzistormi DRF1201 (Q1, Q2) zapojených v pol-mostovej konfigurácii. Tieto tranzistory bude nutné chladiť, ideálne vodným chladením podľa poznatkov z [35]. Výstupný signál je z týchto tranzistorov privedený do C konektoru („type C connector“) (J6).

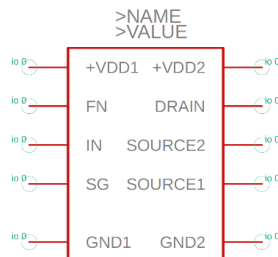
## 10. NÁVRH DPS

Návrh DPS vychádza z predchádzajúceho obvodového riešenia uvedeného v prílohách A-D. Pri návrhu je dôležité dodržať zásady návrhu VF techniky. Pri frekvencii  $f = 13.56 \text{ MHz}$  treba navrhnuť dĺžku signálových ciest pre oba tranzistory v závislosti na vlnovej dĺžke prenášaného signálu rovnakú, aby vplyvom rozdielnej dĺžky cesty nenastal problém s oneskorením signálu na gate elektródach výkonových tranzistorov daného polmostu a tým pádom znovu možnosť na tvorbu hazardných stavov. DPS bola navrhovaná v programe EAGLE, ktorý podporuje kontrolu dĺžky ciest. Problémom je tranzistor, ktorého model nie je bežne dostupný v knižniciach programu, bude ho teda potrebné namodelovať.

### 10.1 Modelovanie tranzistoru DRF1201

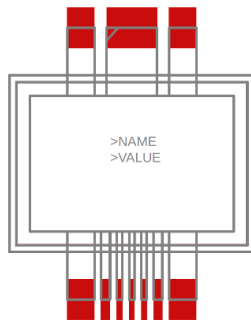
Zvolený tranzistor pre praktickú realizáciu v zapojení výkonovej časti generátora (jeho model) sa nenachádza v default-nej knižnici EAGLE-u a nie je ani dostupný vo voľne šíriteľných knižniciach na internete. Je teda potrebné túto súčiastku namodelovať. Pod modelovaním sa rozumie tvorba schematickej značky a tvorba footprint modelu pre návrh DPS. Oba tieto modely je možné vytvoriť priamo v prostredí EAGLE-u, bez potreby ďalších software-ov.

Výsledný návrh schematickej značky (Symbol) je na obrázku 10.1



Obrázok 10.1 Návrh schematickej značky tranzistoru DRF1201.

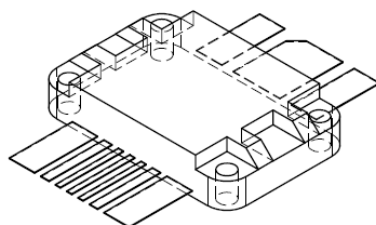
Nasleduje návrh modelu pre tvorbu DPS (footprint), výsledok je zobrazený na obrázku 10.2



Obrázok 10.2 Návrh footprintu tranzistoru DRF1201.

Pri tvorbe footprintu treba dbať na správne pridelenie vývodov tranzistoru k správnym vstupom znázorneným na schematickej značke. Rozmery aj určenie vývodov musia byť samozrejme zhodné s dokumentáciou výrobcu v podobe produktového listu [42].

Následne je možné vytvoriť 3D model pomocou programu Autodesk Fusion 360 a asociovať ho s footprintom v EAGLE-i. Takto nakreslený model je na obrázku 10.3



Obrázok 10.3 3D model tranzistoru DRF1201.

Výkres k 3D modelu sa nachádza v prílohách ako príloha E.

## 10.2 Náležitosti návrhu, návrh dosky DPS

Pri realizácii DPS treba dodržiavať viacero návrhových zásad, medzi hlavné patria

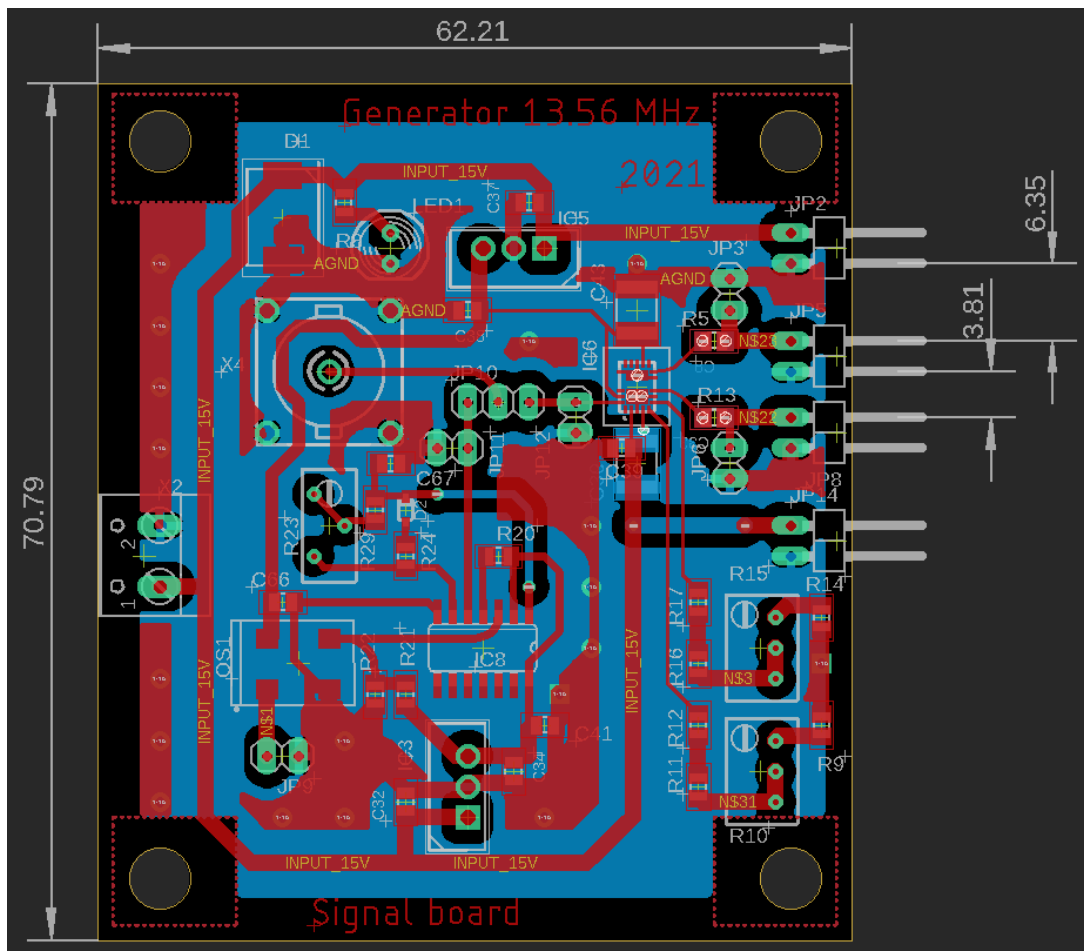
1. Snaha o čo najlepšie využitie miesta na doske z hľadiska rozloženia súčiastok. Voľné miesta na doske zbytočne zvyšujú jej cenu [43],
2. Dodržanie predpísaných pozícií súčiastok, napr.: umiestnenie transilu čo najbližšie ku chránenej časti obvodu, umiestnenie súčiastok, ktorými tečie veľký prúd do čo najmenej vzdialenosti, ..., [43],
3. Kontrola dĺžka ciest vysokofrekvenčných signálov. Zabezpečené príkazom meander, ktorý kontroluje dĺžku ciest [43],
4. Pri použití QFN puzdier vhodné použiť pri chladiacich ploškách prokov a využiť tak lepšieho odvodu tepla zo súčiastky [43].

Tieto zásady boli prevzaté z textu práce [43]. Ďalej sa autor práce v texte do hĺbky zaoberá funkciami programu Eagle a náležitosťami pri návrhu elektronických zariadení.

Nakoľko diskutované obvodové riešenie generátoru je pomerne zložitý, je vhodné pre realizáciu zapojenia voliť viac-vrstvovú DPS. Takisto je vhodné rozdeliť zapojenie na 2 DPS, pričom jedna bude modulom, ktorý realizuje tvorbu a úpravy budiaceho signálu a druhá modulom obsahujúcim výkonové tranzistory. Toto zabezpečí väčšiu variabilitu generátoru a taktiež možnosť vymeniť budiaci obvod v prípade poruchy alebo zmeny cieľovej plazmovej komory. Ďalej je takouto realizáciou zabezpečená možnosť si budiacu časť svedomito nastaviť ešte pred pripojením výkonových tranzistorov a zníženie finančných nákladov pomerne značným zmenšením rozmerov dosky- v prípade vyhotovenia na jednu dosku je riešenie neekonomicky rozmerné. Finálna podoba realizovaných DPS je vo vyhotovení dvojvrstvých dosiek plošných spojov, pričom bolo

zabezpečené správne rozmiestnenie vysokofrekvenčnej signálovej časti a časti slúžiacej k napájaniu obvodov.

Pri realizácii bolo uvažované využitie kombinovanej montáže súčiastok, to znamená, že použité súčiastky budú vo vyhotovení THT aj SMD a to hlavne z dôvodu použitia väčšieho množstva napájacích svorkovnic a meracích pinov. Návrhy DPS sú uvedené v prílohách F-H (obrazy spojov pre každú z vrstiev a obrazy osadenia súčiastok pre každú z vrstiev) a plne korešpondujú s návrhom obvodového riešenia uvedeného v kapitole 9. Súpiska použitých súčiastok na stavbu výkonového generátora je uvedená v prílohe I.



Obrázok 10.4 Ukážka DPS signálovej časti v návrhovom prostredí Eagle.

## 11. MERACIA SONDA

Cieľom nasledujúceho textu je opísať návrh koncepcie meracej sondy pre vyhodnocovanie elektromagnetického poľa do medznej frekvencie  $f_0 = 500$  MHz. Problematika diagnostiky plazmy pomocou meraní magnetického poľa už bola zmienená v kapitole 3. Ako už bolo spomenuté, jedná sa o najjednoduchší spôsob merania parametrov plazmy, nakoľko pre účely merania sú použité koncepčne jednoduché cievky. Tento text sa bude ďalej zaoberať Rogowského cievkou, ktorá je z pohľadu konštrukcie aj cenovej náročnosti najjednoduchším riešením [19].

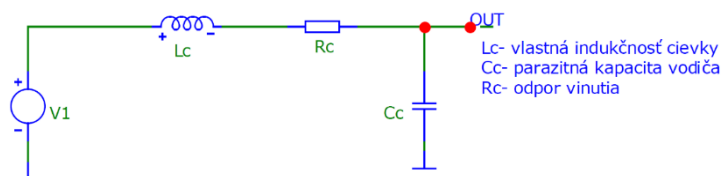
### 11.1 Princíp činnosti Rogowského cievky

Rogowského cievka je lineárny senzor elektrického prúdu [19]. Koncepčne sa jedná o vodič navinutý na elektricky a magneticky nevodivom, toroidnom jadre. Toto zabezpečuje predídenu problémom so saturáciou jadra [44]. Princíp jej činnosti je založený na Faradayovom indukčnom zákone a magnetickej indukcii vo vodiči [16]. Vnúťom cievky prechádza striedavý elektrický prúd (znázornené na obrázku 3.1b), ktorý vo svojom okolí vytvára premenlivé magnetické pole. Toto pole potom zapríčini indukcii elektrického napätia vo vodiči vinutia Rogovského cievky. Pre vyhodnotenie parametrov signálu korešpondujúceho s meraným elektrickým prúdom je mimo iné možné výstupný napäťový signál z Rogowského cievky integrovať [16]. Výstup po procese integrácie je frekvenčne nezávislý a kopíruje priebeh meraného elektrického prúdu [44]. Frekvenčný rozsah sondy je potom daný vnútornou konštrukciou (parametrami  $L_c$  a  $C_c$  náhradnej schémy znázornenej na obrázku 11.1), a jeho presnú hodnotu vymedzuje vlastná rezonancia cievky [19].

Veľkou výhodou uvažovaného riešenia je, že vďaka elektricky nevodivému jadru je možné merať veľké elektrické prúdy pri zachovaní dostatočnej linearite prevodovej charakteristiky a predídenu deštrukcie senzoru [44]. Ďalšou výhodou je to, že výstupný signál je závislý iba od parametrov elektrického prúdu pretekajúcim aktívnou časťou senzoru. Za výhodu možno považovať aj malé rozmery a nízku hmotnosť [19], [44].

Nevýhodou je, že pri ručnej konštrukcii je pomerne zložité dodržať rovnomerné rozloženie závitov na jadre, to môže spôsobiť zvýšenie chyby merania výstupného signálu [44].

Náhradná schéma Rogowského cievky sa nachádza na obrázku 11.1.



Obrázok 11.1 Náhradná schéma Rogowského cievky.



## 11.2 Vyhotovenia Rogowského cievky

Rogowského cievky existujú vo viacerých koncepčných vyhotoveniach. Veľmi častým materiálom pre jadro je kremičitá guma, poprípade je cievka vyhotovená so vzduchovým jadrom. Ďalej sa sondy vyrábajú s ochranným povrchom, ktorý má veľký vplyv na ich elasticitu a teda aj spôsob použitia [19]. Autor v texte [19] delí tieto ochranné povrchy do štyroch skupín, a to

1. Bez ochranného povrchu- veľmi vysoká elasticita [19],
2. Plastické spletenie- dobrý pomer elasticity a mechanickej ochrany, nevhodné do znečisteného prostredia [19],
3. Tepelne zmrštené kryty- dobrá ochrana proti nečistotám, nižšia elasticita [19],
4. Elektrostatická tieniaca sieťka- najmenšia elasticita, vhodné pre meranie malých prúdov [19].

## 11.3 Model Rogowského cievky

Pri modelovaní Rogovského cievky (ako senzoru) ktorej geometria je zobrazená na obrázku 11.2 uvažujeme cievku so vzduchovým jadrom ( $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ), ktorej doplnený odpor  $R = 0.1 \Omega$ , odpor vinutia  $R_c = 47 \Omega$  a parazitná kapacita nahradzujúca elektrické vedenie  $C_c = 100 \text{ pF}$ . Maximálny prúd vnútom cievky som identifikoval ako  $I_{rogo} = 10 \text{ A}$ . Cievka bude vyhotovená s polomerom jadra  $r = 1 \text{ mm}$ .

Pre dopočet vhodnej indukčnosti  $L$  cievky použijem vzťah pre určenie magnetickej indukcie toroidnej cievky

$$B_\phi = \frac{\mu_0 * \mu_r * I * n}{2\pi * r}, \quad (11.1)$$

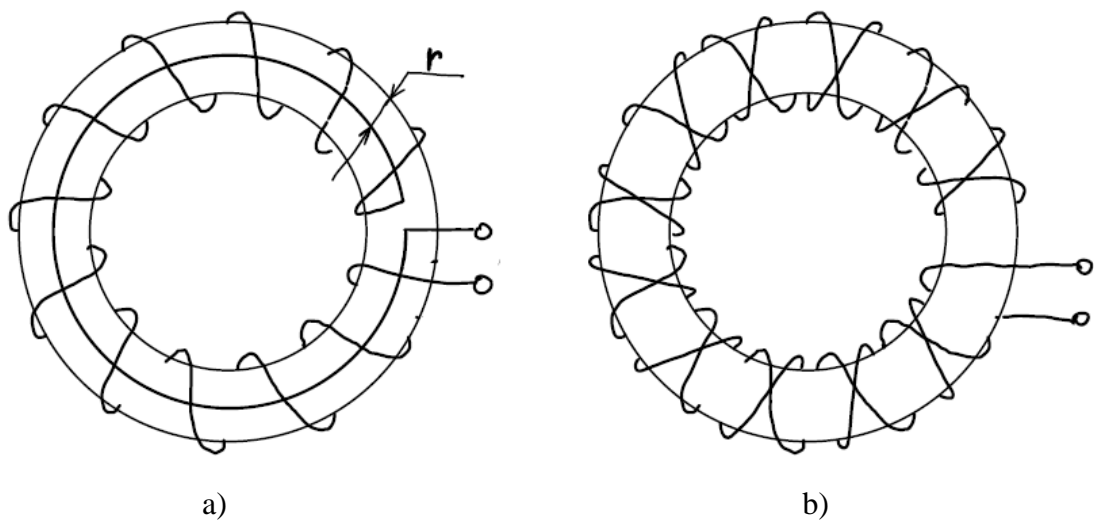
kde  $B_\phi$  je magnetická indukcia toroidálnej cievky,  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  $\mu_r$  relatívna permeabilita,  $I$  uvažovaný budiaci elektrický prúd vnútom cievky,  $r$  polomer jadra,  $n$  počet závitov cievky.

Vypočítaná veľkosť magnetickej indukcie je  $B_\phi = 2.0 \text{ mT}$  (pre cievku s jediným závitom). Z veľkosti magnetickej indukcie v cievke možno dopočítať indukčnosť cievky ako

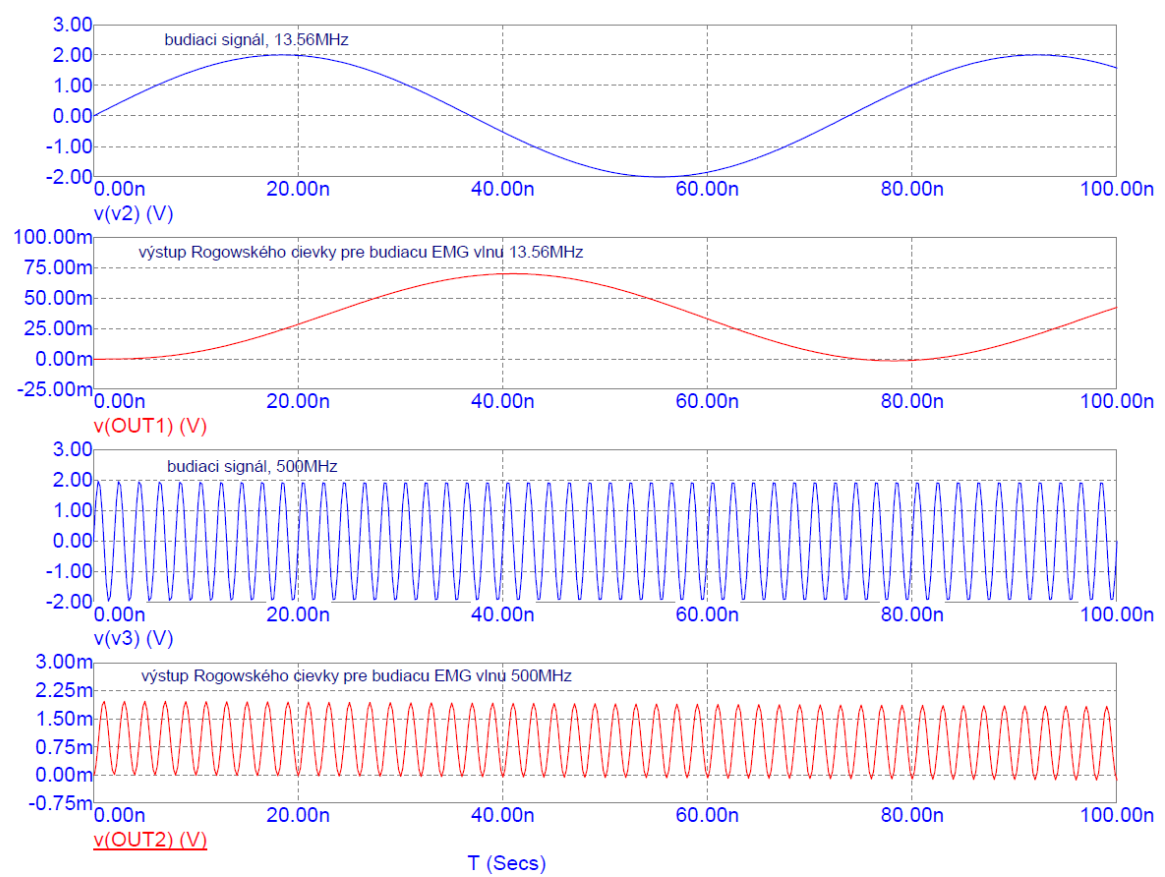
$$L = \int \frac{B_\phi * ds}{I}, \quad (11.2)$$

kde  $L$  je indukčnosť cievky senzoru,  $B_\phi$  magnetická indukcia v strede toroidu,  $I$  elektrický prúd prechádzajúci vnútom cievky,  $s$  plocha cievky.

Pre cievku s  $N = 100$  závitmi je výsledná indukčnosť  $L = 62.8 \text{ nH}$ .

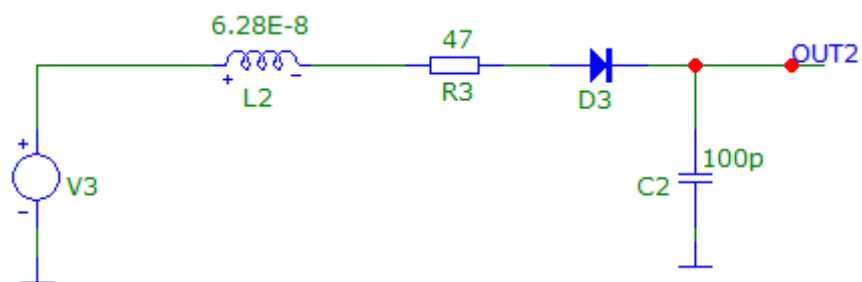


Obrázok 11.2 Geometrická konštrukcia Rogowského cievky/senzoru, a) typická konštrukcia, b) konštrukcia s križeným vnutím.



Obrázok 11.3 Výsledné priebehy simulácie Rogowského cievky/senzoru pre budenie signálom  $f = 13.56$  MHz (hore)  $f = 500$  MHz (dole).

Z priebehov na obrázku 11.3 možno vydedukovať, že sonda bude veľmi presne reagovať na prechádzajúci elektrický prúd s frekvenciou  $f = 13.56$  MHz, čo zodpovedá prvej harmonickej výstupného signálu. Pre elektrický prúd s frekvenciou  $f = 500$  MHz je vidno, že sonda reaguje rovnako adekvátne. Pre finálnu podobu senzoru možno využiť principiálneho zapojenia na obrázku 11.4.



Obrázok 11.4 Principiálna schéma merenia s Rogowského cievkou.

## 12. METODIKA OŽIVOVANIA, LABORATÓRNE TESTY

Správne oživenie navrhnutého výkonového generátoru pracujúceho na frekvencii  $f = 13.56$  MHz s očakávaným výstupným výkonom  $P = 1000$  W je kritická časť pred uvedením generátoru do plnohodnotnej prevádzky. Preto bola navrhnutá metodika ožiovania daného výkonového generátoru, podľa ktorej je potrebné postupovať.

Najprv je nutné začať s oživovaním signálového modulu (obvodový návrh uvedený v prílohe A, obraz DPS v prílohe F). V tejto fáze je dôležité mať signálový a výkonový modul rozpojený. Signálový modul je napájaný jediným zdrojom jednosmerného napätia  $U_{n1} = 15$  V. Po pripojení tohto napätia na svorkovnicu X2 je potrebné overiť tvary a parametre budiacich signálov na prepojkách, ktoré sú k tomuto účelu umiestnené na miestach, kde dochádza k úprave signálu

1. Výstup modulátoru interného oscilátoru (JP11),
2. Výstup z otočného prepínača signálových vstupov (JP12),
3. Výstupy obvodu LMG1210 obsahujúce ošetrovanie mŕtvych dôb výkonových tranzistorov (JP3 a JP6).

V tejto fáze je potrebné nastavenie požadovaných priebehov jednotlivých signálov. Možno upraviť striedu budiaceho signálu interného oscilátoru pomocou trimru (R23) a priebehy budiacich signálov pre výkonové tranzistorov pomocou trimrov (R10 pre Q1 a R15 pre Q2). Po overení ošetrovania hazardných stavov a nastavení požadovaných parametrov budiacich signálov je potrebné odpojiť zdroj  $U_{n1} = 15$  V.

K oživeniu výkonového modulu možno prejsť až po prvom kroku oživenia, ktorým je správne oživenie signálového modulu. Signálový modul sa v tejto fáze pripojí k výkonovému modulu generátora. Následné je potrebné pripojiť zdroj napájania  $U_{n1} = 15$  V na svorkovnicu X2 signálového modulu. Po pripojení tohto napájania je nutné zmerať budiace signály za optočlenmi na prepojkách JP4 (pre tranzistor Q1) a JP7 (pre tranzistor Q2). V prípade správnosti priebehov daných signálov (bez-hazardný stav), možno pripojiť symetrické napájanie pol-mostu. Pripojenie tohto napájania sa realizuje cez svorkovnicu X1 (kladný potenciál, zem) a X5 (záporný potenciál, zem). Je kritické začať zvyšovať toto symetrické napätie postupne, tzn. začať s napätím  $U_{sym} = 0$  V s možnosťou obmedziť maximálny elektrický prúd  $I_{max}$  (napríklad  $I_1=10$  mA,  $I_2=100$  mA,  $I_3=500$  mA,...,  $I_{max}$ ) a postupne hodnotu zvyšovať. Podľa aplikačnej poznámky Microsemi [35] je vhodné nastaviť napájacie napätie pol-mostu na hodnotu  $U_{sym} = \pm 40$  V a počkať cca. 30 minút pred pokračovaním zvyšovania, pričom je vhodné sledovať kritické parametre (napät'ové priebehy budiacich signálov, teplotu tranzistorov, ...). Pri procese zvyšovania napätia treba kontrolovať priebeh výstupného signálu, tvar budiacich signálov a teplotu výkonových tranzistorov. Pri možných komplikáciách treba zdroj symetrického napätia bezodkladne odpojiť. Pri napájaní pol-mostu nesmie byť prekročené maximálne napätie použitého tranzistoru  $U_{DSS} = 1$  kV. Po overení správnosti zapojenia je potrebné zdroje odpojiť v opačnom poradí ako boli zapojené, tj.: najprv zdroj

symetrického napájania pol-mostu (X1, X5), a následne napájanie signálového modulu (X2).

Ako bolo dané v aplikačnej poznámke Microsemi [35], výkonové stupne je treba adekvátne chladiť vodou a všetky pripojené zdroje napätia je treba vhodne ošetriť za účelom potlačenia symetrickej zložky rušenia (CMC) na vedení pre adekvátnu stabilitu riešenia, napríklad tlmivkou.

## 12.1 Laboratórne testy

Po správnom oživení výkonového generátoru možno postúpiť k laboratórnym testom na danom zariadení.

Za základné meranie na predloženom generátore možno považovať určenie účinnosti finálneho zapojenia. Toto meranie je pomerne jednoduché, je potrebné monitorovať elektrické napätie a prúd dodávaný zo zdroja symetrického napätia  $U_{sym}$  určeného k napájaniu pol-mostu a určiť tak dodávaný výkon/príkon  $P_{IN}$ . Rovnako tak je potrebné zmerať výkon na výstupe výkonového generátoru  $P_{OUT}$ . Finálnu hodnotu účinnosti možno určiť podľa vzťahu

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}}, \quad (12.1)$$

kde  $\eta$  je účinnosť  $P_{IN}$  je elektrický príkon,  $P_{OUT}$  výstupný výkon generátoru.

Účinnosť je vhodné vyhodnocovať pre väčší rozsah hodnôt napätia  $U_{sym}$ . Ideálne začať vyhodnocovať pre  $U_{sym} = \pm 40$  V a zvyšovať hodnotu  $U_{sym}$  s krokom  $U_{krok} = 10$  V. Meranie je vhodné ukončiť pri dosiahnutí maximálneho výstupného výkonu daného požadovanými parametrami výkonového generátoru  $P_{OUT} = 1000$  W. Merané parametre výkonov je vhodné zapisovať do tabuľky a pre prehľadnosť vyniesť do grafov. Z grafov možno následne určiť pre ktoré hodnoty napätia  $U_{sym}$  je daný generátor najviac vhodné používať.

Ďalším vhodným meraním na danom generátore je meranie spektra výstupného signálu. Takto by mohlo byť overené zastúpenie vyšších harmonických vo výstupnom signále, poprípade je možné overiť zastúpenie vyšších harmonických vo výstupnom signále pri variabilite výstupného výkonu. Dané meranie je pomerne náročné z technického hľadiska vzhľadom na vysoké napätie  $U_{OUT}$  očakávaného na výstupe. Toto eliminuje možnosť použiť priamo spektrálny analyzátor bez sondy. Pri meraní je namiesto komory sprvu vhodné použiť záťaž  $Z = 50 \Omega$  a až potom pristúpiť k meraniu na samotnej komore.

## 13. ZÁVER

V tejto práci boli popísané základné vlastnosti plazmy ako skupenstva hmoty, súčasný stav riešení v oblasti generovania plazmy, jednotlivé typy elektronických systémov na generovanie plazmy za normálneho tlaku a teploty okolia, ich využitie a výhody. Rovnako bolo popísané riešenie pasívnych aj aktívnych spôsobov diagnostiky parametrov plazmy spolu s uvedením odkazov na práce, kde sa s jednotlivými metódami zaoberajú.

Boli uvedené aktuálne riešenia výkonových elektronických generátorov pracujúcich na frekvencii  $f = 13.56$  MHz.

V práci bolo zmienených viacero spôsobov prístupu k riešeniam problematík spojených s návrhom elektronického generátoru (parametrické prispôsobenie generátor/komora, ošetrovanie hazardných stavov tranzistorov v pol-mostových a mostových konfiguráciách, atď.) spolu s ich vyhodnotením. Z diskutovaných riešení boli potom vybrané najvhodnejšie možnosti realizácie a boli použité v konečnom riešení obvodového návrhu výkonového generátoru. Na základe zvolených prístupov boli vybrané najvhodnejšie súčiastky pre implementáciu.

V prílohách práce sú uvedené schémy konečného obvodového návrhu spolu návrhom dosky plošných spojov. Tá bola za účelom zvýšenia univerzálnosti generátoru realizovaná v podobe dvoch DPS, signálového modulu a výkonového modulu. Tieto moduly bude potrebné pred uvedením do plnohodnotnej prevádzky oživiť podľa postupu opísaného v práci. Všetky súčiastky vo finálnom obvodovom návrhu boli dimenzované s prihliadnutím na variabilitu koncovej plazmovej komory, existuje možnosť použiť okrem budiaceho signálu  $f = 13.56$  MHz aj iný signál, napr.  $f = 27.12$  MHz (maximálne však  $f = 30$  MHz).

Výstupný výkon  $P$  výkonového generátoru bude možné monitorovať pomocou navrhutej sondy pracujúcej na princípe Rogowského cievky, ktorou bude prevlečený vodič spájajúci generátor s plazmovou komorou.

Nakoľko dlhé čakacie doby boli značným problémom, časti generátoru nebolo možné v rámci práce oživiť a podrobiť dokazujúcim testom. Výroba a osadzovanie DPS v dobe odovzdania práce prebieha.

## LITERATÚRA

- [1] CHEN, F. F., 1984. Úvod do fyziky plazmatu. 3. vyd. Praha: Academia.
- [2] CONRADTS, H., 2000. Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, 9(4), pp.441-454.
- [3] GROSS, B., GRYCZ, B. and MIKLÓSSY, K., 1967. *Technika plazmatu*, Praha: SNTL.
- [4] MEHMOOD, F.; KAMAL, T. and ASHRAF, U. Generation and Applications of Plasma (An Academic Review). Preprints 2018, 2018100061 (doi:10.20944/preprints201810.0061.v1).
- [5] BONIZONNI, G. and VASSALLO, E., 2002. Plasma physics and technology; industrial applications. *Vacuum*, 64(3-4), pp.327-336. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00341-4](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00341-4).
- [6] SZENTE, R.N., 1995. Industrial applications of thermal plasmas. In AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, pp. 487-494. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.49010>. (Accessed: 08 October 2020).
- [7] PETREUS, D., GRAMA, A., CADAR, S., PLAIAN, E. and RUSU, A., 2010. Design of a plasma generator based on E power amplifier and impedance matching, *Proceedings of the International Conference on Optimisation of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010*, pp. 1317-1322.
- [8] BITTENCOURT, J.A., 2004. *Fundamentals of plasma physics*: 3rd. edition. 3rd. ed., New York: Springer.
- [9] LIEBERMAN, M.A. and LICHTENBERG, A.J., 2005. *Principles of plasma discharges and materials processing* 2nd ed., Hoboken: Wiley-Interscience.
- [10] WHITE, S., IRWIN, R., WARWICK, J.R., GRIBAKIN, G.F., SARRI, G., KEENAN, F.P., RILEY, D., ROSE, S.J., HILL, E.G., FERLAND, G.J., HAN, B., WANG, F. and ZHAO, G., 2018. Production of photoionized plasmas in the laboratory with x-ray line radiation. *Physical Review E*, 97(6),.
- [11] JÓGI, I., 2011. "Methods of plasma generation and plasma sources", PlasTEP Summer School and Training Course in Warsaw/ Szczecin "Plasma technology for environment protection". Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/25383633/methods-of-plasma-generation-and-plasma-sources-plastep>. (Accessed: 07 October 2020).
- [12] SAFRONAU, Y.A. and SIMONCHIK, L.V., 2011. Non-Self-Sustained Glow Discharges in Atmospheric-Pressure Inert and Molecular Gases in a Three-Electrode Configuration. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), pp.2098-2099. doi:10.1109/TPS.2011.2157530.
- [13] VAGHELA, N., RF (13.56MHz) Impedance matching, [online]. Application Note. Huettinger Electronic Inc. Available at: <http://www.if.ufrgs.br/~ckrug/pvd/rf-1.pdf>. (Accessed: 05 November 2020).
- [14] CHEN, F.F., 2008. Radiofrequency Plasma Sources for Semiconductor Processing. *Advanced Plasma Technology*. pp. 99-115.

- [15] LEBEDEV, Y.A., 2010. Microwave discharges: generation and diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*, 257(1), p.012016. doi: 10.1088/1742-6596/257/1/012016.
- [16] HUTCHINSON, I. H. 2002. *Principles of Plasma Diagnostics*. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511613630.
- [17] ANJUM, Z., YOUNUS, M. and REHMAN, N.U., 2020. Evolution of plasma parameters in capacitively coupled He-O<sub>2</sub>/Ar mixture plasma generated at low pressure using 13.56 MHz generator. *Physica Scripta*, 95(4),.
- [18] DREXLER, P., FIALA, P., KLÍMA, M., GESCHEIDTOVA, E. and ZAJÍČKOVÁ, L., 2019. A Plasma Chamber: Electromagnetic Modeling and Experiments, *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2019*, pp. 2570-2573.
- [19] PORUBAN, M., 2012 *Senzor proudu s digitalizovaným výstupním signálem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vedúci bakalárskej práce bol Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [20] DE LA GARZA, A. E., 2019. On the design, construction, calibration, and testing of a custom Langmuir probe for use in an RF Plasma (Unpublished thesis). Texas State University, San Marcos, Texas.
- [21] KOLPAKOVA, A., KUDRNA, P., and TICHY, M., 2011. Study of Plasma System by OES (Optical Emission Spectroscopy). Available at: [https://www.mff.cuni.cz/veda/konference/wds/proc/pdf11/WDS11\\_231\\_f2\\_Kolpakova.pdf](https://www.mff.cuni.cz/veda/konference/wds/proc/pdf11/WDS11_231_f2_Kolpakova.pdf). (Accessed: 07 December 2020).
- [22] IORDANOVA, S. and KOLEVA, I., 2007. Optical emission spectroscopy diagnostics of inductively-driven plasmas in argon gas at low pressures. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 62(4), pp. 344-356.
- [23] ČADA, M., 2011. NOVÉ METODY DIAGNOSTIKY NÍZKOTEPLOTNÍHO PLAZMATU. [online] Vzdělávání výzkumných pracovníků Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů reg. č.: CZ.1.07/2.3.00/09.0042. Available at: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/seminare/2011-01-28\\_Cada\\_prezentace.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/seminare/2011-01-28_Cada_prezentace.pdf). (Accessed: 07 December 2020).
- [24] YOUNG, M. K., 2008. Chapter 1: Plasma Measurements. *Fusion science and technology*, 53(2), pp.281-303. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/FST08-A1673> (Accessed: 03 December 2020).
- [25] HAMMER, M., 2020. Smithov Diagram A Prispôsobovacie Obvody – Časť 1. [online] Dps-az.cz. Available at: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:2660/smithov-diagram-a-prispobovacie-obvody-cast-1>. (Accessed: 07 December 2020).
- [26] ODUNLADE, E., 2019. Basics Of Smith Charts And How To Use It For Impedance Matching. [online] Circuit Digest. Available at: <https://circuitdigest.com/article/basics-of-smith-chart-and-how-to-use-if-for-impedance-matching> (Accessed: 22 December 2020).



- [27] FIALA, P., 2016. Numerický model, analýza, plazmová tryska I, Výzkumná zpráva IV/16, I-dílčí, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT BRNO, Laboratoř modelování a optimalizace v elektromechanických systémech FEKT VUT v Brně, str.37, 9.12.2016, Brno.
- [28] FIALA, P., 2016. Numerický model, analýza, plazmová tryska II, Výzkumná zpráva IV/16, II-dílčí, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT BRNO, Laboratoř modelování a optimalizace v elektromechanických systémech FEKT VUT v Brně, str. 17, 9.12.2016, Brno.
- [29] FIALA, P., 2016. Numerický model, analýza, plazmová tryska, Funkční test, Výzkumná zpráva IV/16, závěrečná, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT BRNO, Laboratoř modelování a optimalizace v elektromechanických systémech FEKT VUT v Brně, str. 13, 9.12.2016, Brno.
- [30] BEHLKE POWER ELECTRONICS GMBH, 2021. HTS 121-01-C product datasheet, [online]. Available at: <http://www.behlke.com/pdf/181-01-c.pdf>. (Accessed: 18 February 2021).
- [31] BEHLKE POWER ELECTRONICS GMBH, 2021. HTS 121-03-C product datasheet, [online]. Available at: <http://www.behlke.com/pdf/datasheets/361-01-c.pdf>. (Accessed: 18 February 2021).
- [32] BEHLKE POWER ELECTRONICS GMBH, 2021. HTS 151-01 product datasheet, [online]. Available at: [https://www.behlke.com/pdf/151-02\\_3x.pdf](https://www.behlke.com/pdf/151-02_3x.pdf). (Accessed: 18 February 2021).
- [33] DVOŘÁČEK, J., and kol., 1968. Vysokofrekvenční technika (2. nezm. vyd.), Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry.
- [34] LITTELFUSE INC., 2019. Prf-1150 1KW 13.56 MHz class E RF generator evaluation module [online]. Technical Note. Littelfuse Inc. Available at: <https://www.ixys.com/Documents/AppNotes/CO1.pdf>. (Accessed: 05 March 2021).
- [35] MICROSEMI, 2012. 13.56MHz, Class-D Half Bridge, RF Generator with DRF1400. technical note, [online]. Microsemi. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/124244-dr1400-13-56-mhz-class-d-half-bridge-rf-generator](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/124244-dr1400-13-56-mhz-class-d-half-bridge-rf-generator). (Accessed: 30 March 2021).
- [36] IQD, 2021. LFSPX002579 product datasheet, [online]. Available at: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/741/LFSPX0025876Reel-986711.pdf>. (Accessed: 15 April 2021).
- [37] Teledyne relays, 2019. Series 712. product datasheet, [online]. Available at: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/404/712-1222736.pdf>. (Accessed: 15 April 2021).
- [38] Texas Instruments, 2019. LMG1210 200-V, 3-A half-bridge MOSFET and GaN FET driver with adjustable dead time for applications up to 50 MHz. product datasheet, [online]. Available at: <http://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=26&gotoUrl=http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg1210.pdf>. (Accessed: 15 April 2021).

- [39] VARAJAO, D., 2020. Isolated gate driving solutions, [online]. Application Note. Infineon. Available at: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-GateDriverIC\\_EiceDRIVER\\_isolated\\_gate\\_driving\\_solutions-ApplicationNotes-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae60170a0c4af851028](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-GateDriverIC_EiceDRIVER_isolated_gate_driving_solutions-ApplicationNotes-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae60170a0c4af851028). (Accessed: 20 April 2021).
- [40] INFINEON, 2020. EiceDRIVER 2EDI product family. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDS8265H-DataSheet-v02\\_05-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b09037983063](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDS8265H-DataSheet-v02_05-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b09037983063). (Accessed: 20 April 2021).
- [41] HANN2 G., 2019. Optocouplers and silicon-based galvanic isolation technology-how do they work?. Texas Instruments forum, [online]. Available at: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/analogwire/posts/optocouplers-and-silicon-based-galvanic-isolation-technology-how-do-they-work](https://e2e.ti.com/blogs_/b/analogwire/posts/optocouplers-and-silicon-based-galvanic-isolation-technology-how-do-they-work). (Accessed: 21 April 2021).
- [42] MICROSEMI, 2014. DRF1201. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/123790-drf1201-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/123790-drf1201-datasheet). (Accessed: 21 April 2021).
- [43] HANÁK, P., 2020. Návrh plošných spojů v Autodesk Eagle verze 9.5, [skriptá] fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav telekomunikací FEKT VUT BRNO, FEKT VUT v Brně, str. 204, 2020, Brno.
- [44] JUŘÍK, V., 2008. Metodiky a metody snímání jednorázových dějů, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [45] MAGNUSSON P., 2016. Design of an H Bridge. [online]. Axotron. Available at: [https://axotron.se/index\\_en.php?page=34](https://axotron.se/index_en.php?page=34). (Accessed: 29 April 2021).
- [46] RAJ, A., 2018. What is PWM: Pulse Width Modulation. [online] Circuit Digest. Available at: <https://circuitdigest.com/tutorial/what-is-pwm-pulse-width-modulation>. (Accessed 4 May 2021).
- [47] SEDLÁČEK, J. and VALSA, J., 2004. Elektrotechnika II 3. přeprac.vyd., Brno: Vutium.
- [48] BEHLKE POWER ELECTRONICS GMBH, 2021. Fast high voltage transistor switches model series HTS, aplication note, [online]. Available at: <http://www.behlke.com/pdf/general.pdf>. (Accessed: 5 May 2021).
- [49] MICROSEMI, 2013. DRF series design guide. Application Note, [online]. Microsemi. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/123628-drf-series-design-guide](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/123628-drf-series-design-guide). (Accessed: 5 May 2021).
- [50] VRBA, K., 2021. Konstrukce spojů 2021. Prednáškové slajdy predmetu BPC-KEZ. FEKT VUT v Brně
- [51] GREBENNIKOV, A. and Sokal, N., 2007. Switchmode RF power amplifiers. Amsterdam: Elsevier, Newnes.
- [52] TRACO POWER, 2020. THM 20WI series, 20 Watt. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm20wi\\_data-sheet.pdf](https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm20wi_data-sheet.pdf). (Accessed: 9 May 2021).

- [53] TOSHIBA, 2017. TLP2367. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.mouser.sk/datasheet/2/408/TLP2367\\_datasheet\\_en\\_20171025-1075458.pdf](https://www.mouser.sk/datasheet/2/408/TLP2367_datasheet_en_20171025-1075458.pdf). (Accessed: 9 May 2021).
- [54] TEXAS INSTRUMENTS, 2016. LM340, LM340A and LM7805 family wide Vin 1.5-A fixed voltage regulators. product datasheet, [online]. Available at: <http://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=26&gotoUrl=http%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fgpn%2Fln340>. (Accessed: 9 May 2021).
- [55] DIENER ELECTRONIC, 2021. Plasma systems: Generators by Diener electronic. [online] Plasma.com. Available at: <https://www.plasma.com/en/plasma-systems-generators>. (Accessed 12 May 2021).
- [56] ADVANCED ENERGY, 2021. RF Plasma Generators | Plasma Power Generators | Advanced Energy. [online] Advancedenergy.com. Available at: <https://www.advancedenergy.com/products/plasma-power-generators/rf-plasma-generators>. (Accessed 12 May 2021).
- [57] MICROSEMI, 2013. DRF1200. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/123789-dr1200-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/123789-dr1200-datasheet). (Accessed: 12 May 2021).
- [58] MICROSEMI, 2008. ARF1500. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/8233-ar1500-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/8233-ar1500-datasheet). (Accessed: 12 May 2021).
- [59] MICROSEMI, 2008. ARF1505. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/8237-ar1505-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/8237-ar1505-datasheet). (Accessed: 12 May 2021).
- [60] MICROSEMI, 2008. ARF1510. product datasheet, [online]. Available at: [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_download/8241-ar1510-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/8241-ar1510-datasheet). (Accessed: 12 May 2021).
- [61] IXYS RF, 2019. DE375-501N21A rf power mosfet. product datasheet, [online]. Available at: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/IXYS%20PDFs/DE375-501N21A.pdf>. (Accessed: 12 May 2021).
- [62] IXYS RF, 2009. DE475-102N21A rf power mosfet. product datasheet, [online]. Available at: [http://ixapps.ixys.com/DataSheet/DE475\\_102N21A\\_00\\_Datasheet\\_RevA.pdf](http://ixapps.ixys.com/DataSheet/DE475_102N21A_00_Datasheet_RevA.pdf). (Accessed: 12 May 2021).
- [63] MICROSEMI, 2021. Microsemi | Semiconductor & System Solutions | Power Matters. [online] Microsemi.com. Available at: <https://www.microsemi.com>. (Accessed 15 May 2021).
- [64] IXYS, 2021. IXYS corporation. [online] Ixys.com. Available at: <https://www.ixys.com>. (Accessed 15 May 2021).
- [65] LITTELFUSE, 2021. Circuit Protection, Fuses, Power Control & Sensing Solutions - Littelfuse. [online] Littelfuse.com. Available at: <https://www.littelfuse.com>. (Accessed 15 May 2021).

- [66] LITTELFUSE, 2019. TVS diodes, 8.0SMDJ series. product datasheet, [online]. Available at:  
[https://eu.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse\\_TVS\\_Diode\\_8\\_0SMDJ\\_Datasheet.pdf-1840113.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_TVS_Diode_8_0SMDJ_Datasheet.pdf-1840113.pdf). (Accessed: 16 May 2021).

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CCP	Capacitively coupled plasma (kapacitne viazaná plazma)
ICP	Inductively coupled plasma (indukčne viazaná plazma)
HTS	High voltage transistor switches (vysoko- napäťové, tranzistorové spínacie jednotky)
DPS	Doska plošných spojov
VF	Vysoko frekvenčný
THT	Through- hole technology (súčiastky s drátovými vývodmi)
SMD	Surface mount devices (súčiastky pre povrchovú montáž)
EMG	Elektromagnetický/á
CMC	Common mode choke (symetrická zložka rušenia)
FFT	Fast Fourier transformf (rýchla Fourierova analýza)
P-MOSFET	Mosfet s kanálom typu P
N-MOSFET	Mosfet s kanálom typu N

### Symbody:

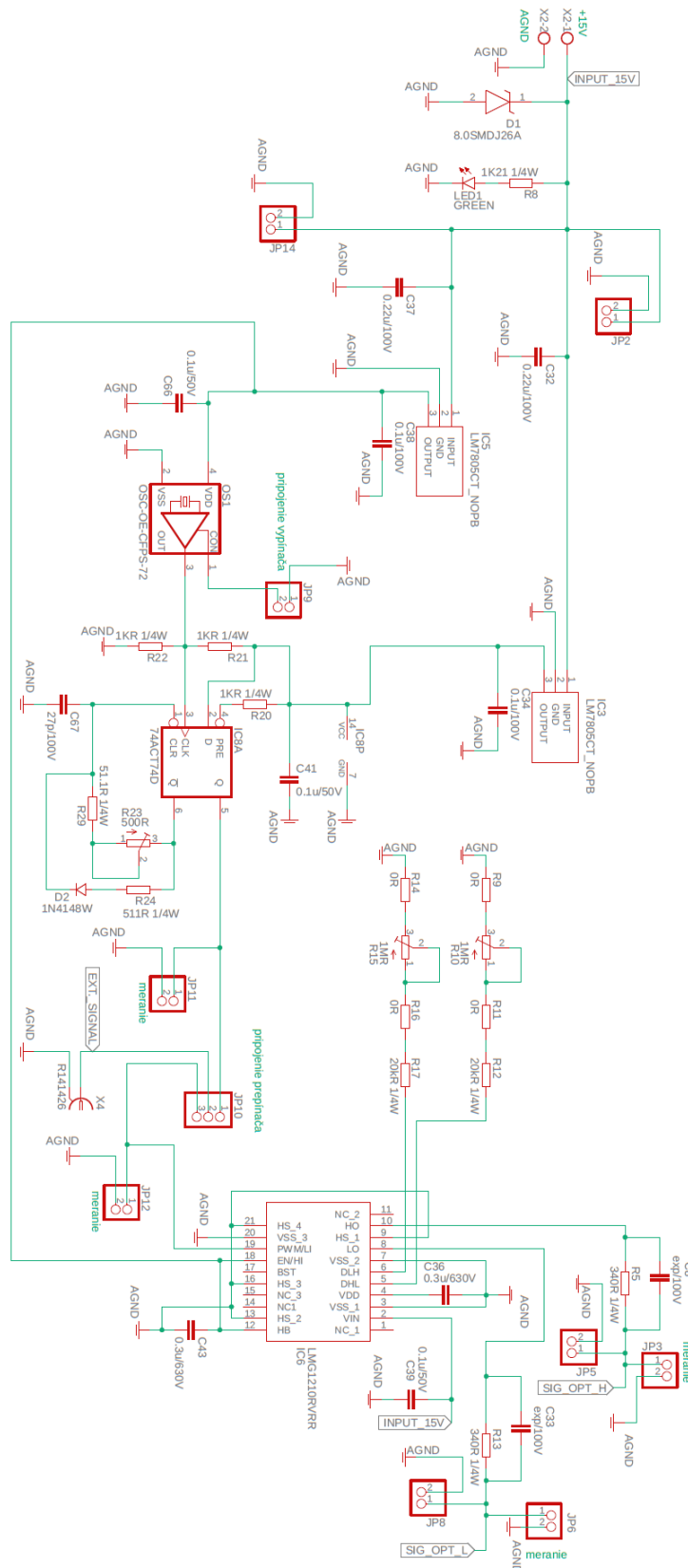
$U$	Elektrické napätie	(V)
$I$	Elektrický prúd	(A)
$f$	Frekvencia	(Hz)
$n$	Počet závitov cievky	(-)
$A$	Plocha prierezu cievky	(m <sup>2</sup> )
$\mu$	Permeabilita	(H*m <sup>-1</sup> )
$B$	Magnetická indukcia	(T)
$n_e$	Hustota elektrónov	(kg*m <sup>-3</sup> )
$q_e$	Náboj elektrónu	(C)
$k$	Boltzmanova konštanta	(J*K <sup>-1</sup> )
$T$	Teplota	(K)
$\lambda_D$	Debye-eho dĺžka	(m)
$\epsilon_0$	Permitivita vákua	(F*m <sup>-1</sup> )
$m_e$	Hmotnosť elektrónov	(kg)
$\omega_{pe}$	Uhlová frekvencia (elektrónov) plazmy	(rad*s <sup>-1</sup> )
$f_{pe}$	Frekvencia (elektrónov) plazmy	(Hz)
$f_{ne}$	Frekvencia zrážok elektrónov a neutrálnych častíc	(Hz)
$\tau$	Stredná doba medzi zrážkami elektrónov s neutrálnymi časticami	(s)

$R$	Elektrický odpor	( $\Omega$ )
$L$	Indukčnosť	(H)
$C$	Kapacita	(F)
$\omega$	Uhlová frekvencia	(rad/s)
$\phi$	Magnetický tok	(Wb)
$\mu_0$	Permeabilita vákua	(H*m <sup>-1</sup> )
$\mu_r$	Relatívna permeabilita	(-)
$r$	Polomer vinutia cievky	(m)
$P_{OUT}$	Elektrický výkon	(W)
$P_{IN}$	Elektrický príkon	(W)
$\eta$	Účinnosť	(-)

# ZOZNAM PRÍLOH

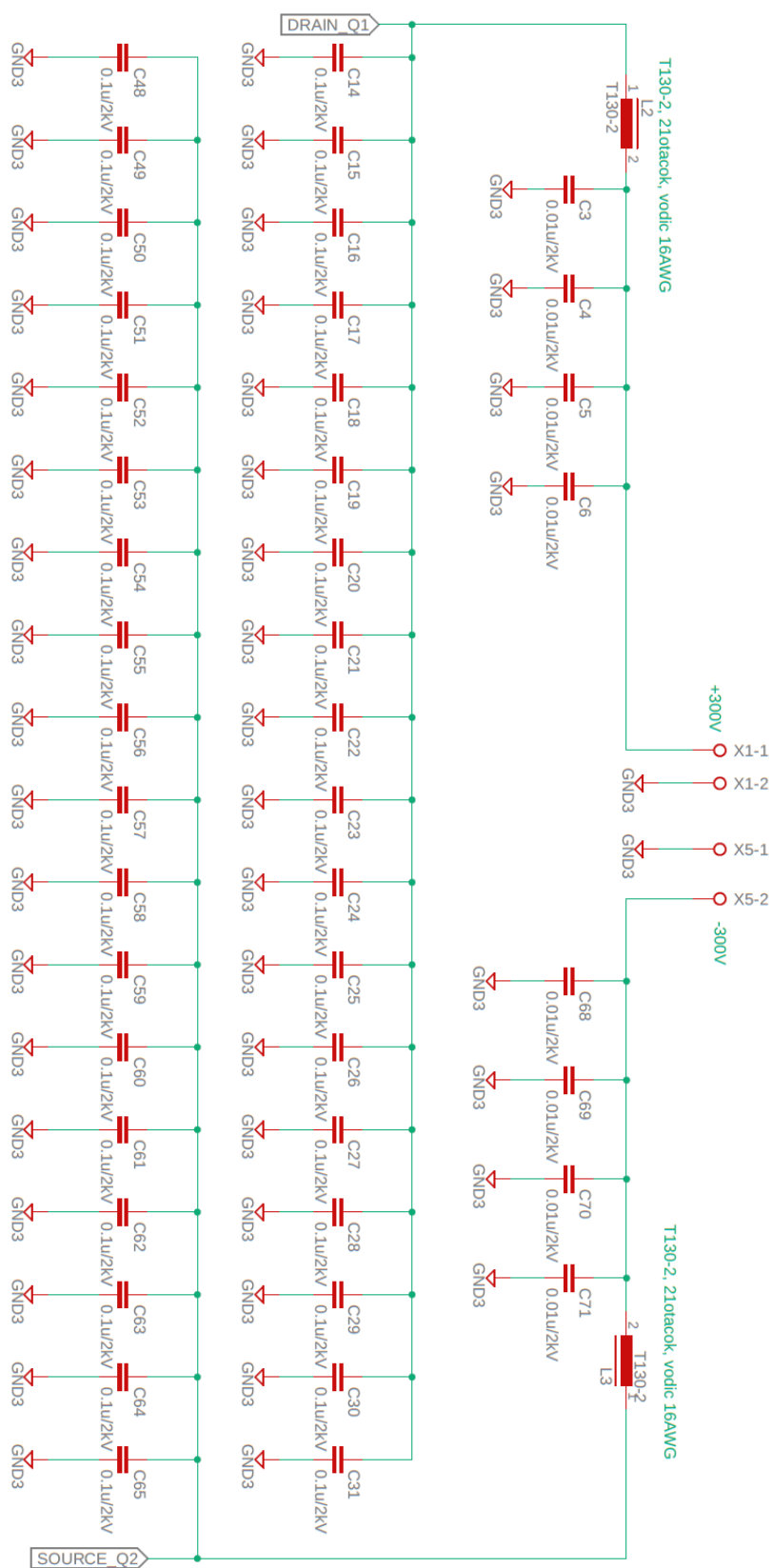
PŘÍLOHA A - SCHÉMA ZAPOJENIA GENERÁTORU $F = 13.56$ MHZ, SIGNÁLOVÝ MODUL .....	79
PŘÍLOHA B - SCHÉMA ZAPOJENIA GENERÁTORU $F = 13.56$ MHZ, VÝKONOVÝ MODUL 1 .....	80
PŘÍLOHA C - SCHÉMA ZAPOJENIA GENERÁTORU $F = 13.56$ MHZ, VÝKONOVÝ MODUL 2 .....	81
PŘÍLOHA D - SCHÉMA ZAPOJENIA GENERÁTORU $F = 13.56$ MHZ, VÝKONOVÝ MODUL 3 .....	82
PŘÍLOHA E - MODEL TRANZISTORU DRF1201.....	83
PŘÍLOHA F - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, SIGNÁLOVÝ MODUL .....	84
PŘÍLOHA G - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, VÝKONOVÝ MODUL 1 .....	85
PŘÍLOHA H - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, VÝKONOVÝ MODUL 2 .....	86
PŘÍLOHA I - SÚPISKA POUŽITÝCH SÚČIASTOK .....	87

# **Příloha A - Schéma zapojenia generátoru $f = 13.56$ MHz, signálový modul**

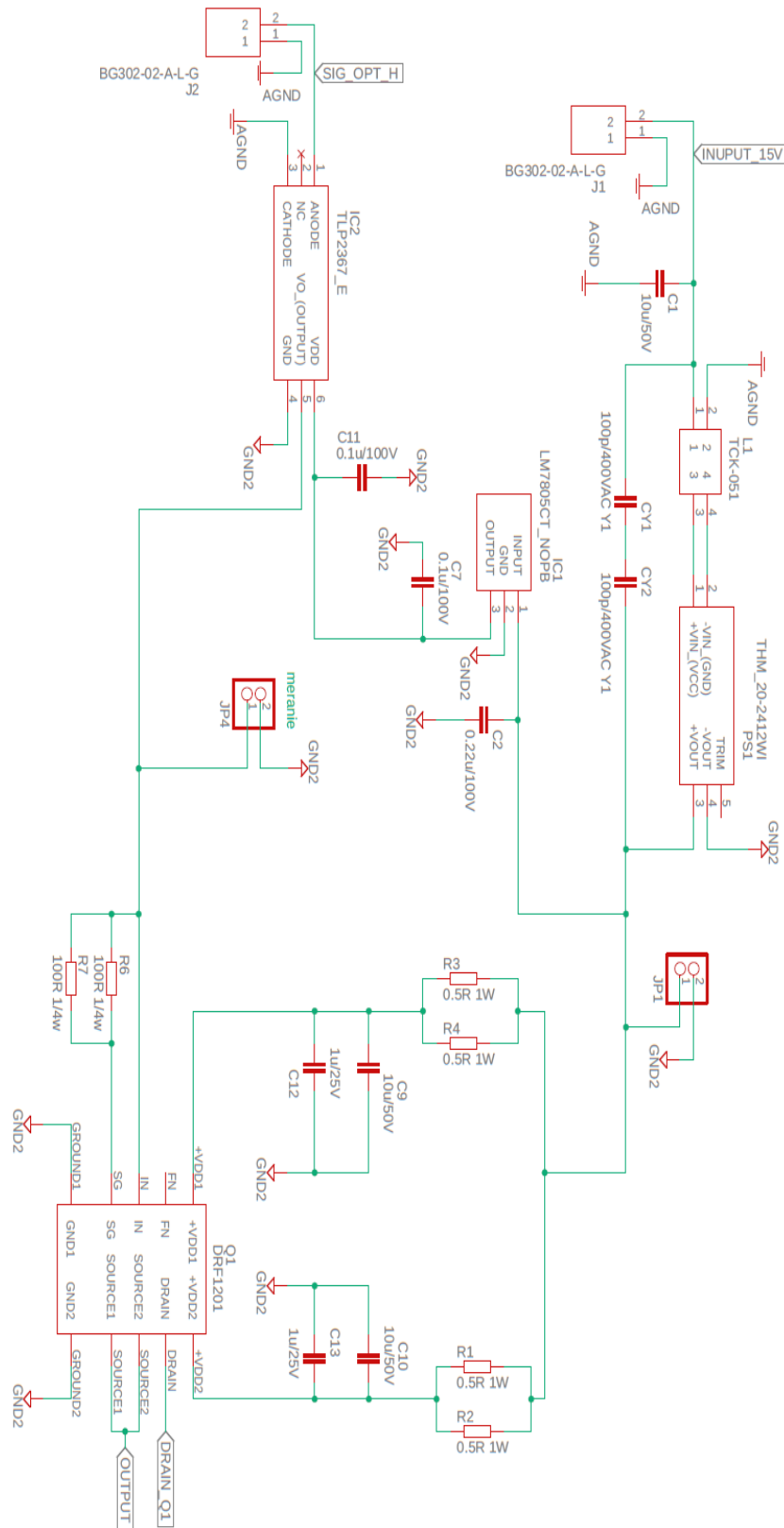




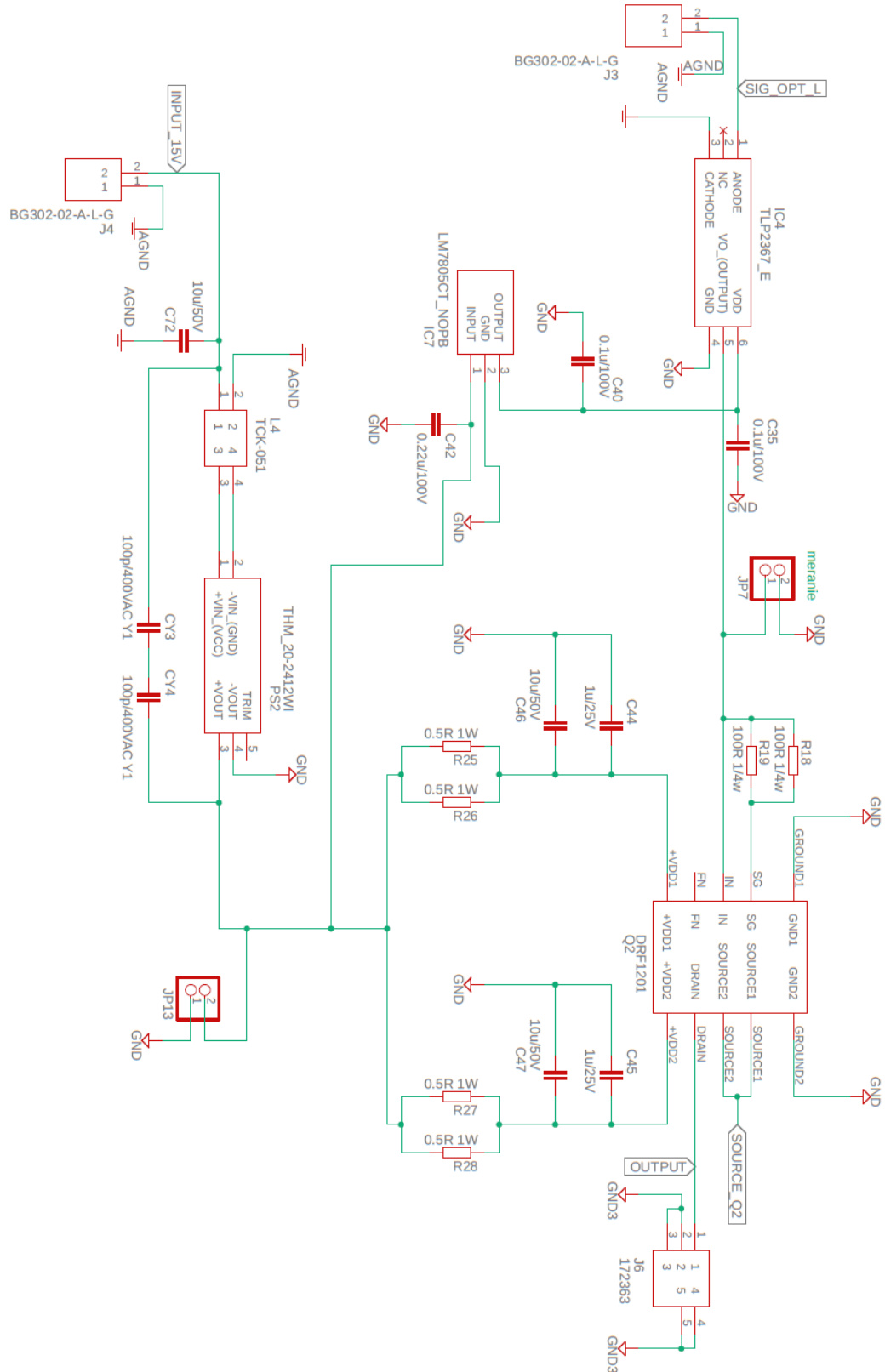
# **Příloha B - Schéma zapojenia generátoru** **$f = 13.56$ MHz, výkonový modul 1**



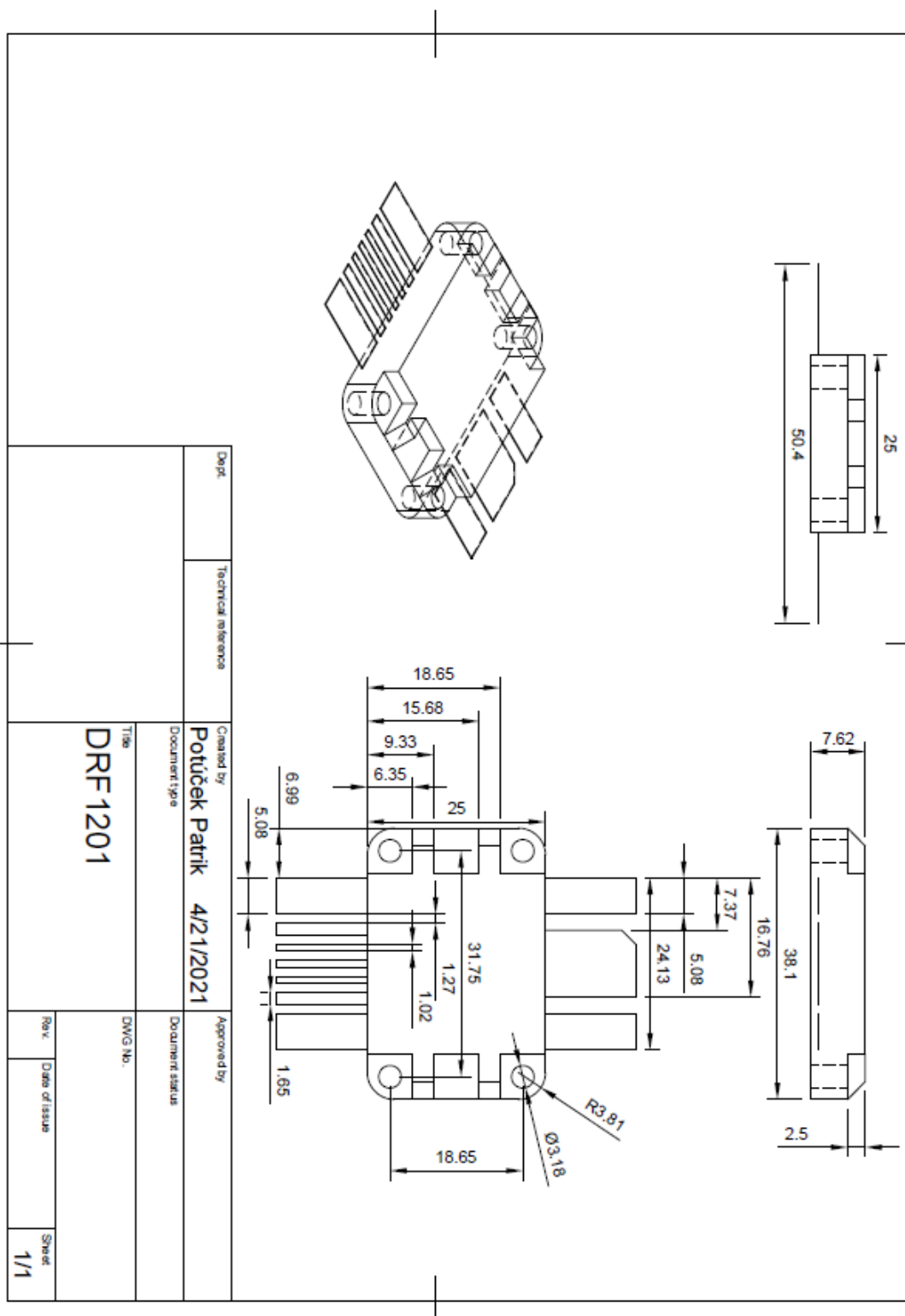
# Příloha C - Schéma zapojenia generátoru $f = 13.56$ MHz, výkonový modul 2



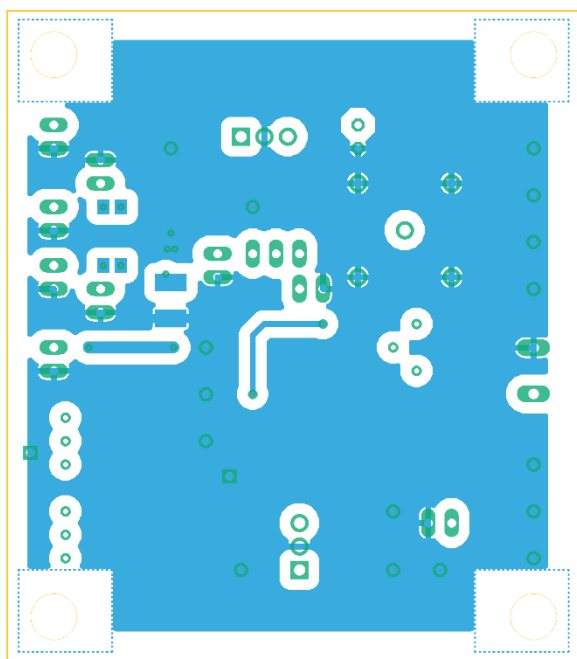
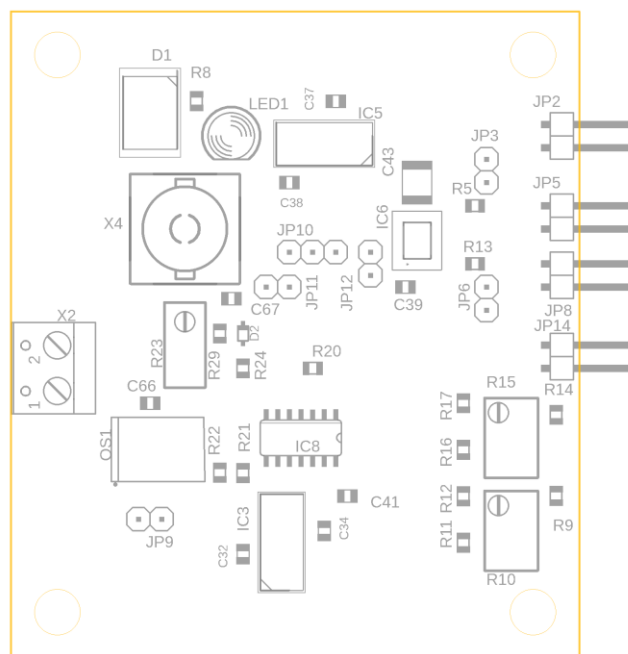
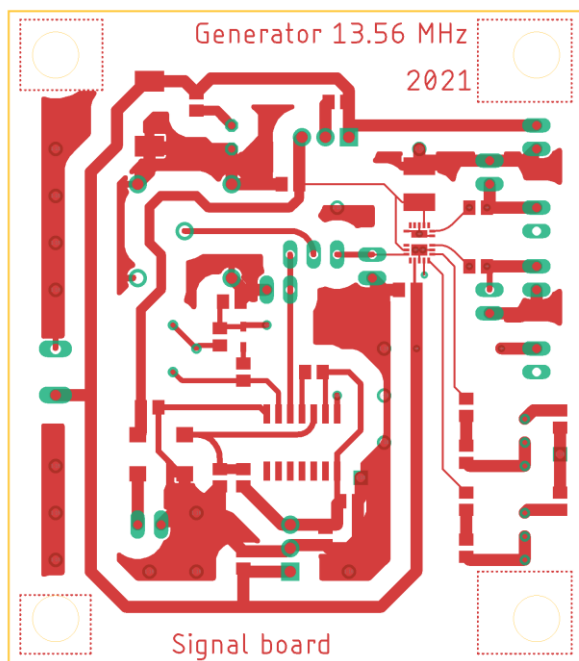
# **Příloha D - Schéma zapojenia generátoru** **$f = 13.56$ MHz, výkonový modul 3**



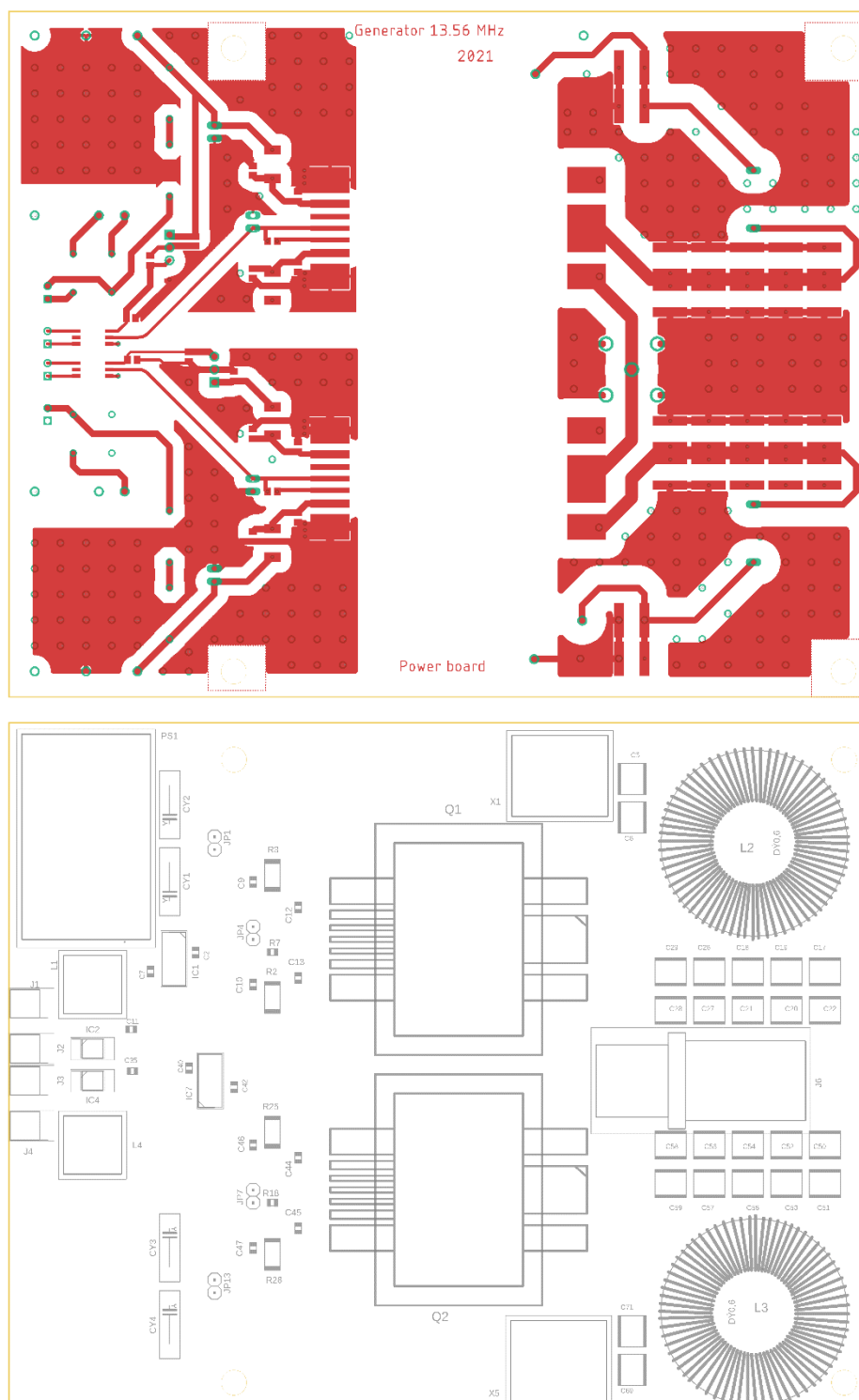
## Příloha E - Model tranzistoru DRF1201



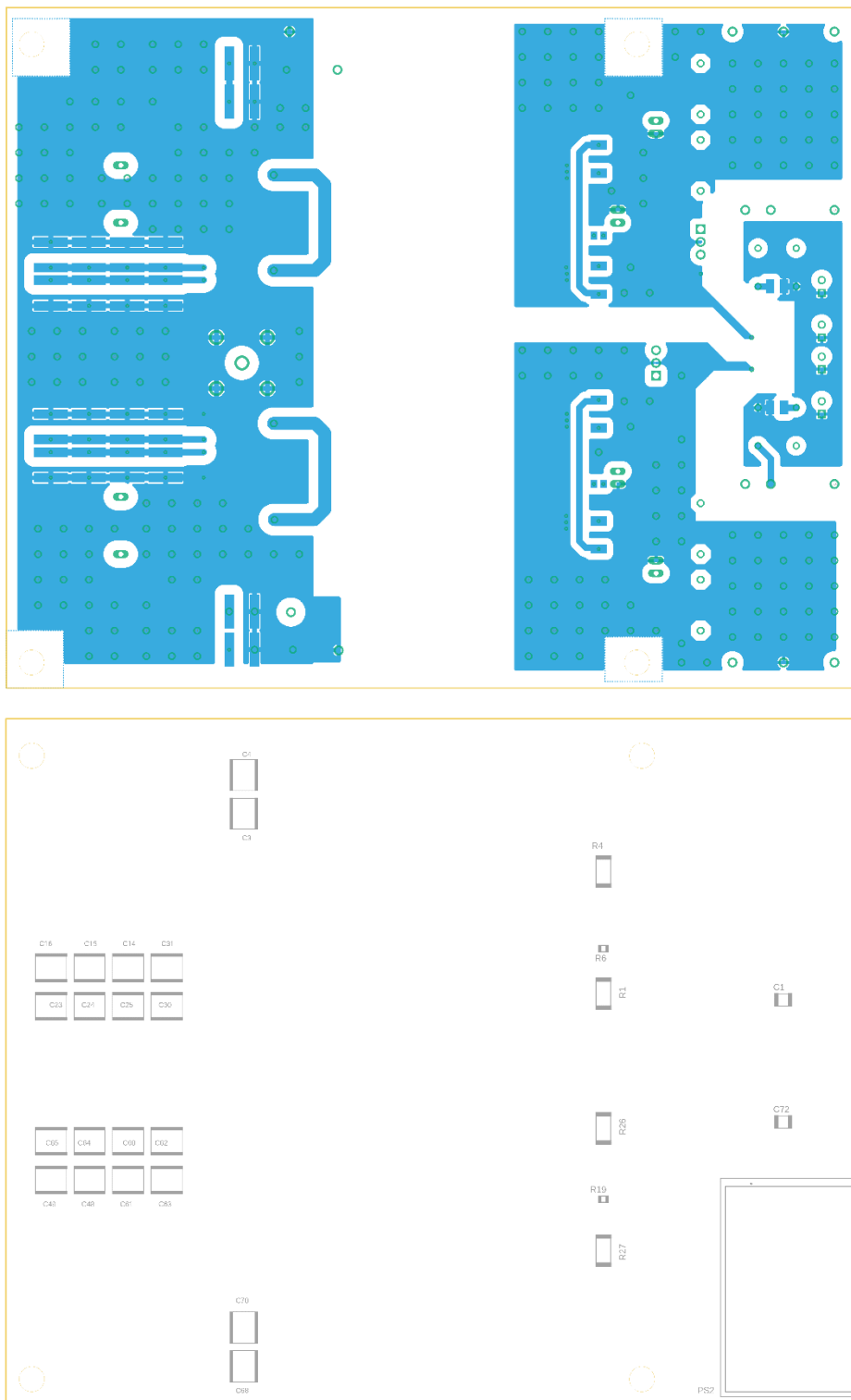
## Příloha F - Spoje a osazení súčiastok DPS, signálový modul



## Příloha G - Spoje a osazení súčiastok DPS, výkonový modul 1



## Příloha H - Spoje a osadenie súčiastok DPS, výkonový modul 2



# Príloha I - Súpiska použitých súčiastok

označenie (DPS)	hodnota	výrobca	označenie výrobcu	puzdro
C1,C72	10uF/50V	Murata electronics	GCM32EL8EH106KA07L	C1210
C2,C32,C37,C42	0.22uF/100V	Kemet	C0805C224K1RECAUTO	C0805
C3-C6, C68-C71	0.01uF/2kV	Kemet	C2225C103KGRACU	C2225K
C7,C11,C34,C35,C38,C40	0.1uF/100V	Kemet	C0805X104K1RAC3316	C0805
C8,C33	experiment/100V			C0805
C9-C10,C46-C47	10uF/50V	Murata electronics	GRM21BR61H106KE43L	C0805
C12-C13,C44-C45	1uF/25V	Kemet	C0805C104J3RECAUTO7210	C0805
C14-C31, C48-C65	0.1uF/2kV	Knowles Syfer	2220Y2K00104KXRWS3	C2220K
C36, C43	0.3uF/630V	Kemet	C1812C304KBRLCAUTO	C1812
C39,C41,C66	0.1uF/50V	Kemet	C0805X104M5RACTU	C0805
C67	27pF/100V	AVX	08051A270J4T2A	C0805
CY1-CY4	100pF/400V	Kemet	C901U101K1VYDAAWL20	LS=10mm
D1	transil 15V	Littelfuse	8.05MDJ15A	DO-214
D2		Micro Commercial Components (MCC)	1N4148WX-TP	SOD-323
IC1,IC3,IC5,IC7	lineárny stabilizátor napätia	Texas Instruments	LM7805CT/NOPB	TO-220-3
IC2,IC4	optočlen	Toshiba	TLP2367/E	SO-6
IC6	half-bridge driver	Texas Instruments	LMG1210RVR	WQFN-19
IC8	D- klopný obvod	Texas Instruments	SN74ACT74DE4	SOIC-14
J1-J4	prepojka (samica) (2.54mm)	GCT	BG302-02-A-L-G	pin-header socket,pitch: 2.54mm
JP2,JP5,JP8,JP14	prepojka (samec) (2.54mm)	GCT	BG303-02-A-0300-L-G	pin-header,pitch: 2.54mm
JP1,JP3,JP4,JP6,JP7,JP9-JP13	prepojka (samec) (2.54mm)	GCT	BG030-02-A-0450-0300-N-G	pin-header,pitch: 2.54mm
L1, L4	tlmivka	TRACO Power	TCK-051	
L2,L3	tlmivka		jadro: T130-2, 21otáčok, 16AWG	
LED1	led dióda 5mm. Zelená	Broadcom/Avago	HLMP-CM3B-Z10DD	T-1 3/4 (5 mm)
OS1	kryštálový oscilátor 13.56MHz	IQD	LFSPXO025876Reel	standard 7x5mm crystal oscillator
Q1,Q2	výkonový tranzistor	Microchip/Microsemi	DRF1201	
PS1,PS2	izolovaný DC/DC menič	TRACO Power	THM 20-2412WI	
R1-R4,R25-R28	0.5Q/1W	KOA Speer	SR733ATTER500F	R2512
R20-R22	1kQ/0.25W		RK73H2ATTD1001D	R0805
R5,R13	340Q/0.25W	Panasonic	ERJ-PB6B3400V	R0805
R6,R7,R18,R19	100Q/0.25W	KOA Speer	RK73H2ATTD1000D	R0805
R8	1.21kQ/ 0.25W	Panasonic	ERJ-PB6B1211V	R0805
R9,R11,R14,R16	0Q	Vishay/Dale	RCC08050000Z0EA	R0805
R10,R15	trimer, 1MQ	Bourns	3296W-1-105LF	
R12,R17	20kQ/0.25w	Panasonic	ERJ-PB6B2002V	R0805
R23	trimer, 500Q	Bourns	3266W-1-501LF	
R24	511Q/0.25w	KOA Speer	RK73H2ATTE5110F	R0805
R29	51.1Q/0.25w	KOA Speer	RK73H2ATTD5112F	R0805
X2	DPS terminál	Pheonix Contact	5442918	
X1,X5	DPS terminál	Pheonix Contact	1756993	
X4	sma konektor, R141426	Radiall	R141426000	
J6	N-type konektor	Amphenol RF	172363	